

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Optimalizace fraktálové antény**  
**The Fractal Antenna Optimisation**

**2017**

**Bc. Lukáš Man**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Lukáš Man**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612T059 Mobilní technologie

Téma:

**Optimalizace fraktálové antény**  
**The Fractal Antenna Optimisation**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Fraktálová anténa je specifický typ širokopásmové antény. Práce si klade za cíl analýzu, optimalizaci, návrh a výrobu modelu antény v zadaném kmitočtovém pásmu.

Vypracování práce bude splňovat následující body zadání:

1. Popište fraktálovou anténu a její specifika.
2. Proveďte simulaci a návrh fraktálové antény v programu CST Studio Microwave.
3. Proveďte optimalizaci vzhledem k maximální širokopásmovosti antény.
4. Realizujte praktický model antény.
5. Proveďte správnost návrhu a konstrukce měřením.

Seznam doporučené odborné literatury:

BALANIS, Constantine. *Antenna Theory : Analysis and design*. 3rd edition. United States : Wiley, 2005. 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.


FUJIMOTO, K. a Hisashi. MORISHITA. *Modern small antennas*. ISBN 9780521877862.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *21. dubna 2017*



.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Chtěl bych touto cestou poděkovat Ing. Marku Dvorskému Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.



## **Abstrakt**

Tématem diplomové práce je specifický druh širokopásmové antény. Cílem práce je analýza, optimalizace, návrh a výroba modelu fraktálové antény v zadaném kmitočtovém pásmu.

Sierpinského fraktál byl zvolen, jako nejvhodnější z fraktálových tvarů pro následnou optimalizaci a výrobu antény. Práce popisuje základní teorii z oblasti fraktálu a věnuje se různým typům fraktálových zobrazení. Blíže však specifikuje Sierpinského fraktál a jeho problematiku. V práci je proveden návrh, simulace, zhotovení a ověření výsledků měřením dvou typů fraktálových antén optimalizovaných vzhledem k co největší širokopásmovosti.

## **Klíčová slova**

Anténa, fraktál, optimalizace, PSV, Sierpinski, S11, širokopásmovost.

## **Abstract**

The topic of my thesis is a specific type of broadband antenna. The aim of this work is the analysis, optimization, design and production of the fractal antenna in a given frequency band.

Sierpinski fractal was chosen as the best of the fractal shape for subsequent optimization and manufacture of antennas. The work describes the basic theory of fractals and areas dedicated to different types of fractal view. But closer specifies Sierpinski fractal and its issues. The work is carried out the design, simulation, fabrication and verification of the results by measuring two types of fractal antennas optimized to given the greatest high bandwidth.

## **Key words**

Antenna, fractal, high bandwidth, optimisation, PSV, Sierpinski, S11.

# Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 9 -
Seznam použitých zkratk.....	- 11 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek .....	- 12 -
Úvod .....	- 16 -
1 Popis fraktálu .....	- 17 -
1.1 Fraktálová geometrie .....	- 17 -
1.1.1 L-systémy .....	- 18 -
1.1.2 Systém iterovaných funkcí.....	- 18 -
1.1.3 Dynamické systémy.....	- 19 -
1.1.4 Nepravidelné fraktály.....	- 20 -
1.2 Dimenze fraktálu .....	- 20 -
1.3 Fraktály kolem nás .....	- 21 -
2 Fraktálové antény .....	- 22 -
2.1 Historie a specifika fraktálových antén.....	- 22 -
2.2 Šířka pásma antén.....	- 23 -
2.2.1 Šířka pásma.....	- 23 -
2.2.2 Vícepásmové struktury .....	- 24 -
2.2.3 Úzkoprofilové monopóly .....	- 25 -
2.3 Fraktálová geometrie v anténní technice .....	- 25 -
2.3.1 Kochova křivka.....	- 25 -
2.3.2 Hilbertova křivka .....	- 27 -
2.3.3 Minkowského fraktál .....	- 27 -
2.3.4 Peanova křivka.....	- 27 -
2.3.5 Pythagorův stromový fraktál.....	- 28 -
2.4 Sierpinského fraktál.....	- 29 -
2.4.1 Sierpinského koberec .....	- 29 -
2.4.2 Sierpinského trojúhelník .....	- 29 -
2.4.3 Sierpinského trojúhelníková anténa .....	- 31 -
2.5 Stanovení cílů a kritérií optimalizace fraktálové antény .....	- 35 -
3 Návrh, simulace a optimalizace fraktálových antén .....	- 36 -
3.1 CST Microwave Studio .....	- 36 -

## Seznam použitých symbolů

---

3.2	Návrh Sierpinského trojúhelníkové antény .....	- 36 -
3.3	Simulace a optimalizace fraktálových antén .....	- 38 -
3.3.1	Simulace v CST Microwave Studiu .....	- 38 -
3.3.2	Optimalizace Sierpinského trojúhelníkové antény .....	- 40 -
3.3.3	Sierpinského pyramidová anténa .....	- 49 -
4	Realizace praktických modelů fraktálové antény .....	- 59 -
4.1	Výroba Sierpinského trojúhelníkové antény .....	- 59 -
4.2	Výroba Sierpinského pyramidové antény .....	- 61 -
5	Ověření správnosti návrhu a konstrukce měřením .....	- 64 -
5.1	Rohde&Schwarz ZVL .....	- 64 -
5.2	Praktické ověření vstupního činitele odrazu a směrových charakteristik antén .....	- 65 -
	Závěr .....	- 69 -
	Použitá literatura .....	- 71 -
	Elektronické přílohy .....	- 72 -
	Přílohy .....	- 73 -

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$a_{0,1,2}$	mm	Délky stran
$B_{abs}$	-	Absolutní šířka pásma
$B_{rel}$	%	Relativní šířka pásma
$c$	m/s	Rychlost světla ve vakuu
$D$	-	Fraktálová dimenze
$D_T$	-	Topologická dimenze
$f_d$	Hz	Dolní frekvence pásma
$f_h$	Hz	Horní frekvence pásma
$f_r$	Hz	Rezonanční frekvence
$f_0$	Hz	Frekvence
$h$	mm	Výška křivky
$h_S$	mm	Velikost největšího trojúhelníku Sierpinského motivu
$h_{0,1,2}$	mm	Výšky trojúhelníků
$k$	-	Konstanta daná typem materiálu
$N$	-	Počet segmentů dané geometrie
$n$	-	Počet iterací
$p_{0,1,2}$	mm	Umístění podstavy
$Q$	-	Kvalita antény
$r$	-	Počet rozdělení segmentu při každé iteraci
$r_1$	-	Faktor změny měřítka
$s$	-	Faktor změny měřítka
$W$	-	Afinní transformace
$x_0$	-	Posunutí transformace
$y_0$	-	Posunutí transformace

# Seznam použitých symbolů

$zk$	mm	Zkosení jehlanu
$Z$	$\Omega$	Charakteristická impedance konektoru
$\alpha$	$^{\circ}$	Vnitřní úhel trojúhelníku
$\delta$	-	Periodicita, hloubka vniku
$\epsilon_r$	-	Relativní permitivita
$\theta$	$^{\circ}$	Stupeň otočení
$\mu$	$Hm^{-1}$	Permeabilita ve vakuu
$\sigma$	S/m	Konduktivita mědi
$\varphi$	$^{\circ}$	Stupeň otočení
$\omega$	$s^{-1}$	Úhlová frekvence

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
<b>2/3D</b>	Dvou/troj dimenzionální
<b>FEM</b>	Metoda konečných prvků (Finite element method)
<b>FIT</b>	Metoda konečné integrace (Finite integration technique)
<b>gcode</b>	Programovací jazyk G (G programming language)
<b>IFS</b>	Systémy iterovaných funkcí
<b>L-systém</b>	Lindenmayerovy systémy
<b>MLFMM</b>	Víceúrovňová rychlá metoda (Multilevel fast multiple method)
<b>MRCM</b>	Víceúrovňová redukce kopírování (Multiple reduction copy machine)
<b>PEC</b>	Dokonalý elektrický vodič (Perfect Electric Conductor)
<b>PLA</b>	Poly lactid acid
<b>PSV</b>	Poměr stojatých vln
<b>PTFE</b>	Teflon
<b>SD</b>	Secure digital
<b>SKV</b>	Super krátké vlny
<b>stl</b>	StereoLithography
<b>UKV</b>	Ultra krátké vlny

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Fraktál generovaný L-systémy	18
1.2	Fraktál generovaný systémy iterovaných funkcí	19
1.3	Fraktál generovaný dynamickým systémem	19
1.4	Nepravidelný fraktál	20
1.5	Fraktálová geometrie v podobě blesku	21
1.6	Fraktálová geometrie v podobě kapradiny	21
1.7	Fraktálová geometrie v podobě pohoří	21
1.8	Fraktálová geometrie v lidském těle	21
2.1	Fraktálová (vlevo) a discone anténa (vpravo)	24
2.2	Úzkoprofilová anténa	25
2.3	Vznik Kochovy křivky	26
2.4	Šest iterací Kochovy vložky	26
2.5	Hilbertova křivka – čtyři iterace	27
2.6	Minkowského fraktál – tři iterace	27
2.7	Peanova křivka	28
2.8	Pythagorův stromový fraktál	28
2.9	Čtyři iterace Sierpinského koberce	29
2.10	Pět iterací Sierpinského trojúhelníku	29
2.11	Sierpinského pyramida	30
2.12	Konstrukce Sierpinského trojúhelníku a pyramidy rozkladem	30
2.13	Konstrukce Sierpinského trojúhelníku a pyramidy kopírováním	31
2.14	Zobrazení iterací Sierpinského trojúhelníkové antény realizované na desku plošného spoje	32
2.15	Rozměry 2. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény	33
3.1	Parametry konektoru	38
3.2	0. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény	41
3.3	1. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény	41
3.4	2. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény	41



3.5	3. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény	41
3.6	4. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény	42
3.7	5. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény	42
3.8	6. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény	42
3.9	Vstupní činitel odrazu pro 4. iteraci Sierpinského trojúhelníkové antény před optimalizací	43
3.10	Vliv změny výšky $h$ na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu pro 4. iteraci	43
3.11	Vliv změny délky strany $a$ na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu pro 4. iteraci	44
3.12	Vliv změny polohy zářiče vůči reflektoru na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu pro 4. iteraci	44
3.13	Obrazce a body metody Nelder Mead Simplex	45
3.14	Vstupní činitel odrazu pro optimalizovanou 4. iteraci	46
3.15	Zisk 4. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény v závislosti na frekvenci	46
3.16	Směrová charakteristika Sierpinského trojúhelníkové antény pro 2,4 GHz	47
3.17	Směrová charakteristika Sierpinského trojúhelníkové antény pro 5 GHz	47
3.18	3D směrová charakteristika Sierpinského trojúhelníkové antény pro 2,4GHz	48
3.19	3D směrová charakteristika Sierpinského trojúhelníkové antény pro 5 GHz	48
3.20	Zobrazení iterací Sierpinského pyramidové antény realizované 3D tiskem	49
3.21	0. iterace Sierpinského pyramidy	50
3.22	1. iterace Sierpinského pyramidy	50
3.23	2. iterace Sierpinského pyramidy	51
3.24	3. iterace Sierpinského pyramidy	51
3.25	4. iterace Sierpinského pyramidy	51
3.26	Vstupní činitel odrazu pro 3. iteraci Sierpinského pyramidy před optimalizací	52
3.27	Analyzované parametry Sierpinského pyramidy	52

<b>3.28</b>	Vliv změny výšky na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu pro 3. iteraci Sierpinského pyramid	53
<b>3.29</b>	Vliv změny délky strany na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu pro 3. iteraci Sierpinského pyramid	53
<b>3.30</b>	Vliv změny polohy zářiče vůči reflektoru na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu pro 3. iteraci Sierpinského pyramid	54
<b>3.31</b>	Vstupní činitel odrazu pro 3. iteraci Sierpinského pyramid	55
<b>3.32</b>	Zisk pro 3. iteraci Sierpinského pyramid	56
<b>3.33</b>	Směrová charakteristika Sierpinského trojúhelníkové antény pro 2,4 GHz	56
<b>3.34</b>	Směrová charakteristika Sierpinského trojúhelníkové antény pro 5 GHz	57
<b>3.35</b>	3D směrová charakteristika Sierpinského trojúhelníkové antény pro 2,4GHz	57
<b>3.36</b>	3D směrová charakteristika Sierpinského trojúhelníkové antény pro 5 GHz	58
<b>4.1</b>	Praktický model optimalizované Sierpinského trojúhelníkové antény 4. iterace	60
<b>4.2</b>	Návrh upraveného modelu zářiče pro 3D tisk	62
<b>4.3</b>	Návrh nevytisknutelného modelu zářiče pro 3D tisk	62
<b>4.4</b>	Detail upevnění zářiče k reflektoru Sierpinského pyramid	63
<b>4.5</b>	Praktický model optimalizované Sierpinského pyramid 3. iterace	63
<b>5.1</b>	Vektorový analyzátor Rohde&Schwarz ZVL-13	64
<b>5.2</b>	Měřené hodnoty vstupního činitele odrazu Sierpinského pyramidové antény	65
<b>5.3</b>	Měřené hodnoty vstupního činitele odrazu Sierpinského trojúhelníkové antény	66
<b>5.4</b>	Směrové charakteristiky Sierpinského pyramidové antény ( $f = 3 \text{ GHz}$ )	67
<b>5.5</b>	Směrové charakteristiky Sierpinského pyramidové antény ( $f = 6 \text{ GHz}$ )	67

<b>5.6</b>	Směrové charakteristiky Sierpinského pyramidové antény ( $f = 9$ GHz)	67
<b>5.7</b>	Směrové charakteristiky Sierpinského pyramidové antény ( $f = 12$ GHz)	68

---

<b>Číslo tabulky</b>	<b>Název tabulky</b>	<b>Číslo stránky</b>
<b>3.1</b>	Rozměry šesti iterací Sierpinského trojúhelníkové antény	37
<b>3.2</b>	Nastavení mezí optimalizace metodou Nelder Mead Simplex pro Sierpinského trojúhelník	45
<b>3.3</b>	Hodnoty optimalizované simulace Sierpinského trojúhelníkové antény	46
<b>3.4</b>	Nastavení mezí optimalizace metodou Nelder Mead Simplex pro Sierpinského pyramidu	54
<b>3.5</b>	Hodnoty optimalizované simulace 3. iterace Sierpinského pyramidy	55

---

## Úvod

Při navrhování antén je vždy snahou přijít s novými nápady a novým designem za pomoci využití co nejmenší struktury a současně s cílem dosáhnout co největší širokopásmovosti a příznivého zisku antény. Jeden z navrhovaných způsobů, jak zvýšit šířku pásma a zároveň zmenšit velikosti antény, je přes použití fraktálové geometrie, která dává vzniknout fraktálovým anténám.

Fraktály jsou velmi zajímavou a poměrně mladou vědní disciplínou, první zmínka slova fraktál pochází z 60. let dvacátého století. Velké množství antén pracuje na jednom či dvou frekvenčních pásmech, kde jsou zapotřebí různé antény pro různé aplikace. To způsobuje omezení prostoru a problém s nedostatkem místa. Za účelem překonání tohoto problému jsou používány širokopásmové antény, kdy je využita jedna jediná anténa, která dokáže pracovat na více frekvenčních pásmech. Jednou z technik zkonstruování širokopásmového druhu antény se zabývá tato diplomová práce. Jedná se o anténu s fraktálovým motivem. Tento druh antén právě díky fraktálové geometrii dokáže splnit nejdůležitější parametry, za které jsou dnes považovány, velmi malá velikost, ale naopak velký frekvenční rozsah.

Práce nejdříve objasňuje základní pojmy z teorie fraktálu. Věnuje se zde fraktálové geometrii. Kde popisuje vznik a dimenze fraktálu. Kapitola dále pokračuje popisem fraktálových motivů kolem nás, kde je zřejmé, jak velké množství fraktálu se vyskytuje téměř na každém kroku v běžném životě.

Hlavní náplní druhé kapitoly je přiblížení problematiky fraktálových antén. Převážně jsou zde popsány specifiká a výhody využití tohoto typu antén. Kapitola poukazuje na různé druhy fraktálových tvarů pro využití v anténní technice, jsou jimi: Kochova křivka, Peanova křivka, Pythagorův strom, Sierpinského trojúhelník a koberec nebo Hilbertova křivka. Detailněji se věnuje Sierpinského trojúhelníku, jelikož tento typ antény bude sloužit pro návrh a modelaci antény realizované v této práci. Dále se zde popisuje geometrie a způsob výpočtu parametrů pro sestrojení modelu antén.

Třetí kapitola pojednává o návrhu a modelaci Sierpinského trojúhelníkové antény v programu CST Microwave Studio. Kapitola popisuje detailní návrh v tomto programu a na základě vyhodnocení výsledků simulace je provedena optimalizace vzhledem k maximální širokopásmovosti antény. Dále jsou zde zkoumány další možnosti konstrukcí Sierpinského fraktálu, kde jako vhodnou variantou pro zlepšení širokopásmovosti a praktickou realizaci je vybrán model Sierpinského pyramidy. U modelu je provedena analýza vlivů a optimalizace vzhledem k širokopásmovosti.

Čtvrtá kapitola obsahuje popis provedení samotné realizace antén. Je zde detailně popsána výroba antén na základě předešlých simulací. V kapitole jsou uvedeny i materiály potřebné pro konstrukci antén.

Závěrečná pátá kapitola ověřuje správnost návrhu a konstrukce měřením, za pomoci zkoumání parametru vstupního činitele odrazu měřeného vektorovým obvodovým analyzátozem a měřením směrových charakteristik v bezodrazové komoře.

# 1 Popis fraktálu

## 1.1 Fraktálová geometrie

Fraktálová geometrie je samostatná vědní disciplína. Termín fraktál použil poprvé matematik Benoît Mandelbrot v roce 1975. Pochází z latinského fractus – rozbitý. Podobné typy objektů byly známy v matematice již dlouho předtím. Fraktály jsou na první pohled nejsložitější geometrické objekty, které současná matematika zkoumá, mají však často překvapivě jednoduchou matematickou strukturu. Geometricky lze fraktál definovat jednoduše jedním slovem, a to slovem soběpodobnost – znamená to, že pokud daný útvar pozorujeme v jakémkoliv měřítku či rozlišení, pozorujeme stále opakující se určitý charakteristický tvar neboli motiv. Většinou na první pohled mívají fraktály velmi složité či nerozpoznatelné tvary, ale jsou generovány opakovaným použitím jednoduchých pravidel. [1]

Fraktály můžeme označit za nepravidelné geometrické útvary, které jsou dělitelné na jednotlivé části, přičemž každá z částí je v ideálním případě zmenšenou kopií původního celku. Jde o množiny, jejichž geometrický motiv se opakuje v základním tělese až do nekonečna a tato, již zmíněná základní charakteristická vlastnost se nazývá soběpodobnost.

I před zavedením pojmu fraktál a fraktálová geometrie se vědci a umělci zabývali geometrickými útvary, které dnes nazýváme fraktály (např. Kochova sněhová vločka nebo Sierpinského koberec).

Tak, jako v každé vědní disciplíně, i ve fraktálové geometrii se po určitém čase začaly rozlišovat jednotlivé typy fraktálu. Toto rozlišení není zavedeno jen kvůli systematickosti, ale i proto, že jednotlivé typy fraktálu jsou vhodné pro řešení určitého okruhu problémů, které se vyskytují v různých oborech. Způsob generování se liší podle typu fraktálu. Možností generování fraktálu je nepřeberné množství, avšak zmíním zde jedny z nejznámějších metod pro výpočet a generování fraktálu v počítačové a anténní technice. V počítačové technice převládá způsob generování fraktálu za pomoci výpočetních algoritmů. [2]

Rozlišení generování fraktálu v počítačové technice je následující:

- L-systémy,
- IFS – systémy iterovaných funkcí,
- dynamické systémy,
- nepravidelné fraktály (statisticky soběpodobné).

Tyto techniky jsou podrobně popsány v následujících kapitolách práce.

V anténních strukturách jsou využívány podobné způsoby jako u počítačové techniky. Zejména systém iterovaných funkcí je využívaným prvkem v tomto odvětví. Využívají se převážně dvě techniky generování fraktálu:

- deterministický způsob výpočtu,
- metoda chaos game.

Podrobnější popis generování fraktálu v anténní technice je v kapitole 2.4.2.

### 1.1.1 L-systémy

L-systémy (Lindenmayerovy systémy) jsou skupinou fraktálů definovaných pomocí prepisovacích gramatik. Název pochází z anglického sousloví LOGO-like turtle. LOGO je programovací jazyk, ve kterém se na základě jednoduchých příkazů daly kreslit různé obrazce pomocí želvy. Podstatou tvorby L-systémů je prepisování řetězců podle určitých pravidel. Každý symbol v řetězci má přiřazen jistý geometrický význam, například transformaci či generování objektu.

Zajímavé obrazce se začnou tvořit, jestliže v LOGu použijeme iteraci, což odpovídá iteraci v gramatice (na pravé straně pravidla je nonterminální symbol shodný se symbolem na levé straně pravidla). S pomocí L-systémů lze generovat fraktály, které se podobají rostlinám, stromům a dalším přírodním útvarům (obr. 1.1). Poslední aplikace také směřují k využití těchto fraktálů při generování textur.



Obrázek 1.1: *Fraktál generovaný L-systémy*

### 1.1.2 Systém iterovaných funkcí

Systém iterovaných funkcí je generativní metoda tvoření fraktálu. Tato metoda je vhodná jak pro generování fraktálu, tak i pro kompresi bitmapových obrazů, zavedeme-li tzv. inverzní úlohu. Zajímavé je, že tato metoda může být jak deterministická, tak i náhodná. Oboje však paradoxně vede ke stejnému výslednému fraktálu, použijeme-li dostatečný počet iterací  $n$ .

Pro  $n$  iterací, můžeme využít tzv. afinní transformaci, která je velmi hojně využívána například v počítačové grafice. Využití vhodných funkcí afinní transformace, jako jsou otáčení, posunutí a změna měřítka je možno využít právě pro fraktály, jelikož si jsou soběpodobné (obr. 1.2). [2] Tyto transformace mohou být vyjádřeny v matematické formě jako:

$$W = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \cos \theta & -s \cos \varphi \\ r_1 \sin \theta & s \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Kde:

$r_1$  a  $s$  jsou faktory změny měřítka,

$\theta$  a  $\varphi$  jsou rovny stupňům otočení,

$x_0$  a  $y_0$  jsou hodnoty posunutí dané transformace.

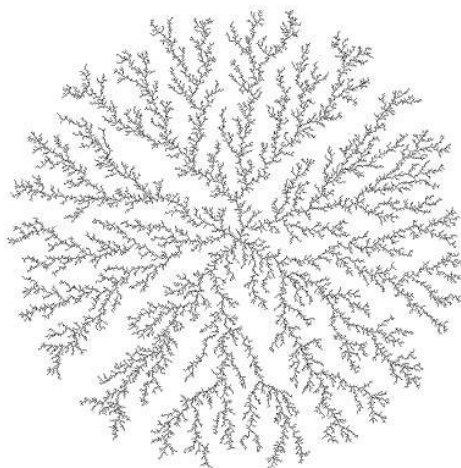
Opakovaným aplikováním afinních transformací na objekt se postupně začne objevovat fraktálová struktura. Protože je afinních transformací pro daný fraktál obvykle potřeba více zapisují se jejich parametry do tabulek. Pomocí afinních transformací je možno sestavit celou řadu různých fraktálů. Tento proces generování fraktálové geometrie je velmi hojně využíván v souvislosti s počítačovou grafikou, kde je nazýván *multiple reduction copy machine* (MRCM). V matematice je tento proces označován právě jako *iterated function systems* (IFS) neboli systém iterovaných funkcí.



Obrázek 1.2: *Fraktál generovaný systémem iterovaných funkcí*

### 1.1.3 Dynamické systémy

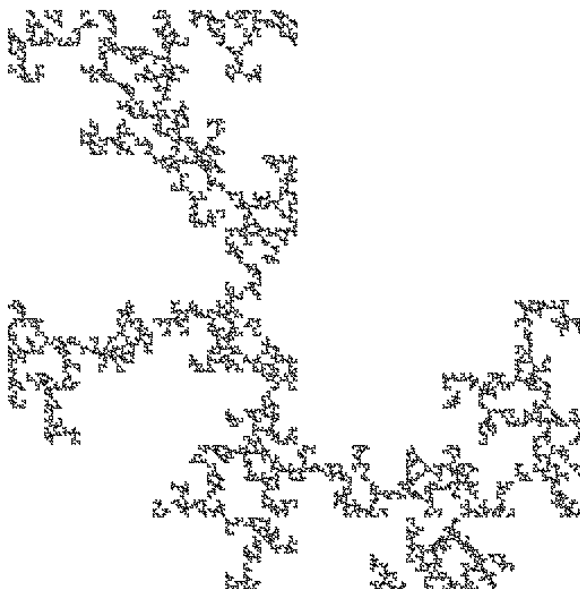
Dynamické systémy jsou pravděpodobně tím typem fraktálu, který má v technické praxi nejširší uplatnění. Dynamický systém je matematický model, který je závislý na nějaké proměnné, většinou to bývá na čase. Dynamický systém vychází z počátečních podmínek a je jimi v čase determinován (obr. 1.3).



Obrázek 1.3: *Fraktál generovaný dynamickým systémem*

#### 1.1.4 Nepravidelné fraktály

Další skupinou fraktálu jsou nepravidelné fraktály. Zatímco všechny předchozí skupiny fraktálu byly v určitém smyslu symetrické, nepravidelné fraktály vnášejí při generování fraktálu do algoritmu náhodu. Tento typ fraktálu také umožňuje nejlepší popis přírodních objektů. Zatímco při generování stromu klasickým L-systémem nebo IFS koláží dostaneme jako výsledek perfektně symetrický strom, je skutečnost už na první pohled zcela jiná. Strom rostoucí v přírodě má nepravidelné délky a tloušťky větví, úhel růstu větví také není vždy stejný, strom rostoucí v lese má jiný tvar než tentýž druh stromu rostoucí osamoceně apod. Proto je velmi vhodné zavést do generování fraktálu náhodu (obr. 1.4).



Obrázek 1.4: *Nepravidelný fraktál*

### 1.2 Dimenze fraktálu

Fraktály jsou tvořeny nekonečně složitými útvary, které je možné rozdělit na části tvořící kopie základního celku. Jedná se o objekty, u nichž je Hausdorffova dimenze (fraktálová dimenze) o mnoho vyšší než hodnota Topologické dimenze [3].

Topologická dimenze je značena zkratkou  $D_T$ . Určuje fyzický rozměr objektů vykreslených v 0D, 1D, 2D a 3D zobrazení. Pro známé geometrické útvary má topologická dimenze následující hodnoty:  $D_T = 0$  pro bod,  $D_T = 1$  pro přímku,  $D_T = 2$  pro plochu a  $D_T = 3$  pro prostorový objekt [3].

Hausdorffova-Besicovitchova dimenze rozděluje objekty dle jejich členitosti. Pokud je rozdíl  $D$  a  $D_T$  malý, tak se jedná o málo členitý objekt a naopak [3].

Fraktály jsou na základě jejich 2D a 3D struktury děleny na soběpodobné a soběpříbuzné. Soběpodobné fraktály jsou založeny na matematickém popisu. To znamená, že se s každou další iterací opakuje stejný objekt, jehož velikost se zmenšuje přímo úměrně počtu iterací. Soběpříbuzné fraktály jsou založeny na svojí vzájemné podobnosti. Náhodně zvolená část fraktálu je podobná druhému a naopak. Mezi reprezentativní vzorek soběpodobných fraktálů se řadí zejména přírodní fraktály [1].



### 1.3 Fraktály kolem nás

Fraktály nejsou jen složité tvary a pěkné obrázky vytvořené pomocí počítačů. Cokoliv, co se zdá náhodné a nepravidelné může být fraktálové. V přírodě, ač si to mnoho z nás neuvědomuje, je možné na objekty s fraktálovou strukturou narazit doslova na každém kroku.

Teoreticky lze argumentovat, že všechno, co existuje na tomto světě, je fraktálové:

- listy na stromech,
- žíly na ruce,
- oblačnost či bouřka (obr. 1.5),
- molekula DNA,
- akciový trh,
- nízké rostliny (obr. 1.6),
- pohoří (obr. 1.7),
- různé cévy v lidském těle (obr. 1.8) a mnoho dalších.

Fraktály mají stále více a více aplikací ve vědě. Hlavním důvodem je to, že velmi často popisují reálný svět lépe než tradiční matematika a fyzika. Další možné nalezení fraktálu je právě ve fyzice, telekomunikacích, chemii, biologii, počítačové grafice, astronomii, medicíně a mnoha dalších vědních disciplínách, které nemají se studiem geometrických objektů zdánlivě nic společného. Zmíněné využití fraktálu v telekomunikacích je předmětem této diplomové práce, konkrétně využití fraktálové geometrie pro konstrukci širokopásmové antény fraktálového typu.



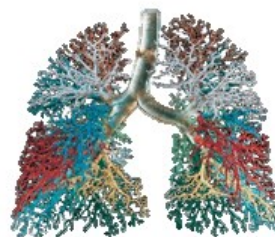
Obrázek 1.5: *Fraktálová geometrie v podobě blesku*



Obrázek 1.6: *Fraktálová geometrie v podobě kapradiny*



Obrázek 1.7: *Fraktálová geometrie v podobě pohoří*



Obrázek 1.8: *Fraktálová geometrie v lidském těle*

## 2 Fraktálové antény

### 2.1 Historie a specifika fraktálových antén

S myšlenkou použití tzv. fraktálové antény přišel jako první Nathan Cohen. Již v roce 1988, jako profesor Bostonské univerzity vyrukoval s návrhem fraktálové antény [5]. Avšak až o několik let později, v roce 1995 bylo úsilí Cohena zveřejněno. Od tohoto roku byla vydána řada publikací a patentů vztahujících se k fraktálovým anténám.

Soběpodobné fraktály obsahují své kopie, ovšem v jiném měřítku. Přičemž při konstrukci vícepásmových antén je využíváno právě těchto geometrických vlastností. Jejich využitím na anténní struktuře je získán fraktálový motiv, jehož aplikací je možné anténu ladit do více kmitočtových pásem.

Ve většině případu využíváme tzv. iterace, při nichž dochází ke zmíněnému opakování fraktálových motivů. A právě díky iteracím dochází k ladění antény do více kmitočtových pásem. Je definován pojem teoretický fraktál, kde jeho definicí je sestavení nekonečného počtu iterací, tudíž nekonečného počtu rezonančních frekvencí. Tento typ fraktálu, je však prakticky nemožné zhotovit. Počet iterací použitých při návrhu antény limituje počet pracovních pásem ve frekvenční oblasti. Velikost jednotlivých iterovaných prvků ovlivňuje i umístění pásem ve frekvenční oblasti. Ve frekvenčním spektru pracovní oblasti vykazují jisté periodické chování. Takové vlastnosti najdeme i u známých širokopásmových antén, jako jsou např. logaritmicko-periodická anténa, logaritmická spirála atd. I antény tohoto typu se mohou považovat za antény fraktálové. [3] [5]

Jak již bylo výše zmíněno, fraktálové antény se vyznačují širokopásmovým rozsahem, a přitom jsou malé a kompaktní, což je předurčuje k využití například v mobilní technice nebo armádě. Nejvyužívanějšími křivkami pro návrh antén jsou Kochova křivka (obr. 2.3) a Sierpinského trojúhelník (obr. 2.10). Tyto typy křivek jsou detailně zpracovány v dalších kapitolách práce.

Hlavní funkce fraktálových antén:

Soběpodobnost	Užitečné při navrhování širokopásmové antény
Malý rozměr	Užitečné při navrhování elektricky malých antén
Zvyšující se počet iterací	Užitečné ke snížení rezonanční frekvence, zatímco elektrická délka se zvyšuje
Ostré hrany, rohy a diskontinuita	Zapříčiňuje, aby anténa efektivně vyzařovala

Při využití fraktálové geometrie v anténní technice existují tyto hlavní výhody k rozvoji různých anténních prvků:

- vytvoření antény malých rozměrů,
- dosažení vícepásmové rezonanční frekvence,
- lepší vstupní impedance,
- optimalizace zisku antény,
- konzistentní výkon přes velký frekvenční rozsah,
- širokopásmové frekvenční pásmo – jedna anténa může nahradit více antén. [6]

Využití fraktálové geometrie má i své nevýhody:

- výroba a design je složitější,
- nižší zisk v některých případech,
- numerické omezení,
- výkon začíná klesat po první malé iteraci.

## 2.2 Šířka pásma antén

### 2.2.1 Šířka pásma

Jeden z hlavních cílů v komunikačních systémech je návrh širokopásmových malých antén. Aplikace těchto antén zahrnují využití pro osobní komunikační systémy, malé satelitní komunikační terminály, bezpilotní prostředky, a mnoho dalších. K nejznámějším širokopásmovým anténám patří např. discone anténa, logaritmicko-periodická anténa či právě různé varianty fraktálových antén.

Šířka pásma antén je definována, jako kmitočtový rozsah, kde parametry antény odpovídají určité předpokládané charakteristice, specifikům a určitým standardům antény. Šířka pásma může být považována za rozsah frekvencí (obvykle rezonanční frekvence na dipól), kde anténní vlastnosti (např. vstupní impedance, šířka svazku, polarizace, zisk, směr paprsku, účinnost záření) jsou v přijatelných hodnotách. Pro širokopásmové antény, je obvykle šířka pásma vyjádřena, jako poměr horní ku dolní frekvenci přijatelného provozu. Pro příklad, 10:1 znamená, že šířka pásma horní frekvence je 10krát větší než dolní frekvence. Pro úzkopásmové antény, je šířka pásma vyjádřena, jako procentuální podíl frekvenčního rozdílu horní a dolní frekvence. Například šířka pásma 5 % naznačuje, že rozdíl frekvence přijatelného provozu je 5 % od střední frekvence pásma. [7]

Aby bylo možné používat anténu k přenosu informací, musí být přizpůsobena v určitém pásmu frekvenčního spektra, a nikoliv na jedné frekvenci. Je tudíž nezbytně nutné docílit potřebnou šířku pásma, ve kterém se bude anténa používat. Šířku pásma lze stanovit jednak absolutně (2.1), k námi stanoveným mezím, například přizpůsobení antény nebo častěji relativně ve vztahu ke střednímu kmitočtu  $f_0$  (2.2).

$$B_{abs} = f_h - f_d \quad (2.1)$$

Kde  $f_h$  je horní frekvence pásma na stanovené mezi a  $f_d$  je dolní frekvence pásma na stanovené mezi. Stanovená mez může být například  $s_{11} = -10 \text{ dB}$  a pásmo použití je tam, kde má  $s_{11}$  hodnotu menší.

$$B_{rel} = \frac{B_{abs}}{f_0} \cdot 100 [\%] \quad (2.2)$$

Obecně šířka pásma antén závisí na tvaru např. zářiče (flíčku), vlastnostech substrátu, napájení, hodnotě činitele jakosti antény, vybuzení násobných rezonancí a impedančním přizpůsobení. U širokopásmových planárních antén tomu není jinak. [7]

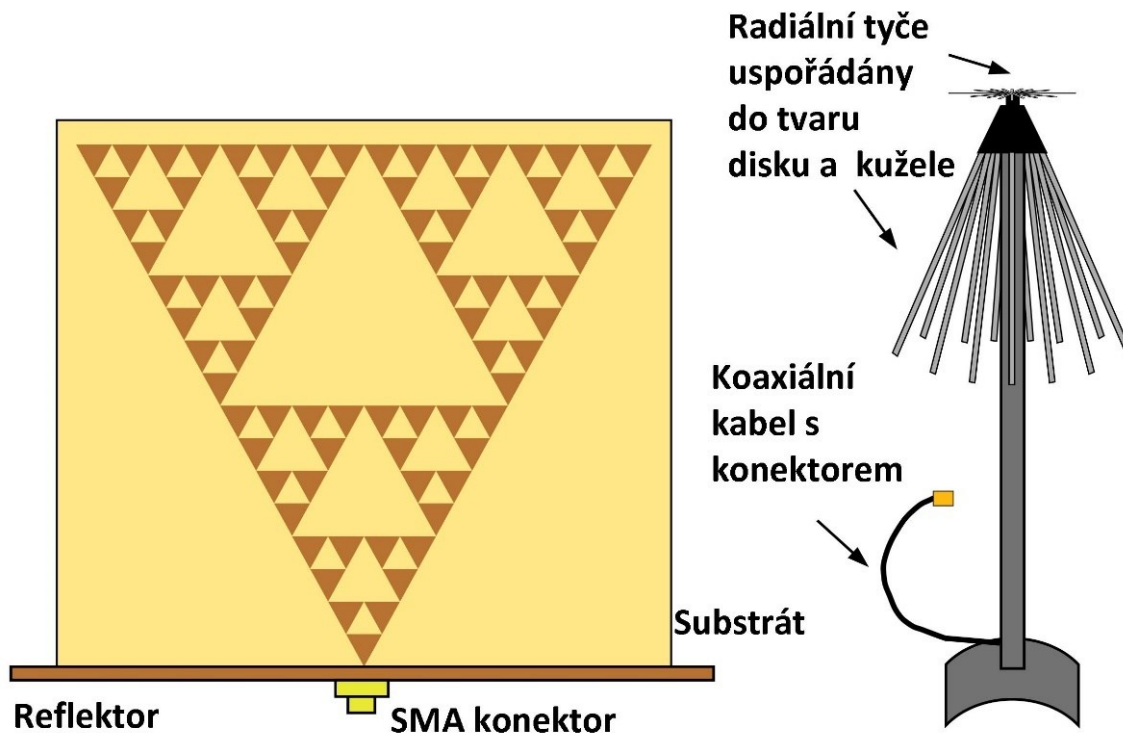
Za zmínku určitě stojí i faktor Q, který udává kvalitu antény. Faktor Q antény slouží k měření šířky pásma vzhledem ke střednímu kmitočtu  $f_0$ . V případě, že anténa pracuje nad pásmem mezi  $f_d$  a  $f_h$  se středovým kmitočtem  $f_0 = \frac{(f_d + f_h)}{2}$ , pak Q je dán vztahem (2.3):

$$Q = \frac{f_0}{f_h - f_d} \quad (2.3)$$

Antény s vysokou hodnotou  $Q$  jsou označovány jako úzkopásmové a antény s nízkým  $Q$  jsou širokopásmové. Čím vyšší je hodnota  $Q$ , tím citlivější je vstupní impedance i při malých změnách frekvencí.

### 2.2.2 Vícepásmové struktury

Vícepásmové anténní struktury lze charakterizovat možností pracovat vyhovujícím způsobem ve dvou a více frekvenčních pásmech. Aby mohla být splněna podmínka rezonance na různých kmitočtech, musí struktura obsahovat různé rezonanční rozměry. Například rezonance čtvrtvlnného ( $\lambda/4$ ) monopólu je dominantně určena jeho délkou. Monopól rezonuje na  $\lambda/4$  a další rezonance jsou vzdálené o celočíselné násobky  $\lambda/2$ . Násobnost délek lze použít pouze pro násobné kmitočty, například u Globálního Systému pro Mobilní komunikace. Na násobných kmitočtech rezonuje většina anténních struktur. Problémem jsou rezonance i na nenásobných kmitočtech. Tuto problematiku řeší struktury s více stupni volnosti, parametrizovány více rozměry. Více stupňů volnosti dává více možností pro ladění rezonancí a nastavení základních parametrů antény na požadovanou hodnotu. Podstatná je také dostatečná šířka všech pásem. Rozvoj mobilní techniky klade důraz na co nejmenší rozměry při zachování vyhovujících impedančních, směrových a polarizačních vlastností. Nejvíce používanou strukturou jsou fraktálové antény, discone antény (obr. 2.1) nebo také planární antény typu obrácené F, zkráceně PIFA (Planar Inverted – F Antena). [7]

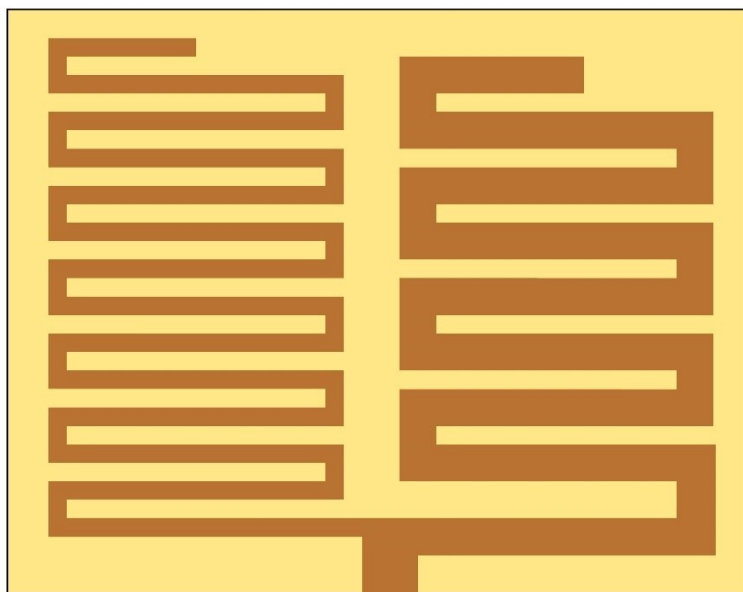


Obrázek 2.1: Fraktálová (vlevo) a discone anténa (vpravo)

### 2.2.3 Úzkoprofilové monopóly

Představují klasický monopól realizovaný jako tenký kovový pásek na dielektrické podložce (obr. 2.2). Výhodou těchto antén jsou malé rozměry a jednoduchost výroby. Nevýhodou je malá šířka pásma. Dále pak vyzařovací účinnost a zisk, který dosahuje nízkých, avšak pro antény mobilních telefonů vyhovujících hodnot. Příkladem skládaných monopólů mohou být vícepásmové, prostorově skládané antény. Disponují výhodou, že je lze prostorově složit, např. do tvaru kvádru. Ramena antény (zářič) zůstávají stále úzkoprofilové. Konstrukce takových struktur je značně složitá a vyžaduje rozsáhlé znalosti a zkušenosti konstruktéra. Díky svým vlastnostem jsou však v různých podobách používány ve většině dnešních mobilních zařízení.

Úzkopásmovou anténou můžeme nazvat takovou anténu, jejíž poměr stojatých vln se bude pohybovat v rozmezí mezi 1 až 1,5. Společně s klesající hodnotou poměru stojatých vln nám rovněž bude narůstat vlastní zisk antény. Z tohoto hlediska vyplývá, že co se týče zisku, vyplatí se anténu navrhnout pro jeden konkrétní kmitočet, ovšem jen jestli to vlastní zadání a určení v praxi dovolí, což ve většině případů nebývá možné a je nutno jít cestou kompromisů. [5] [8]



Obrázek 2.2: Úzkoprofilová anténa

## 2.3 Fraktálová geometrie v anténní technice

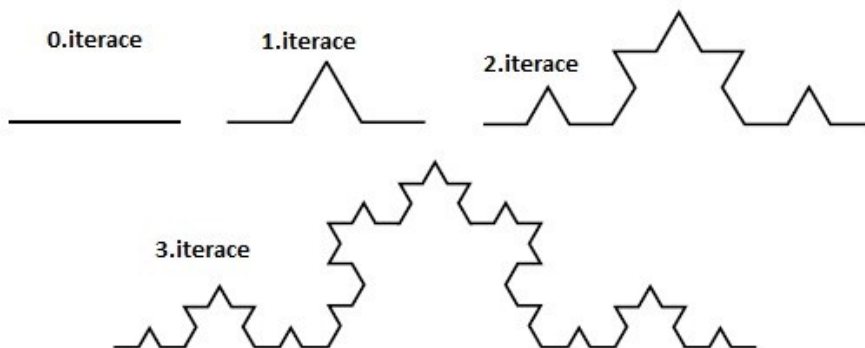
Existuje mnoho druhů fraktálů, které byly shledány jako užitečné při vývoji nových a inovativních designech pro antény. Nyní si v této kapitole a v kapitole 2.4 popíšeme nejznámější a nejpoužívanější geometrie, a to Kochovu křivku, Hilbertovu křivku, Minkowského fraktál, Peanovu křivku, Pythagorův strom, Sierpinského trojúhelník a Sierpinského koberec.

### 2.3.1 Kochova křivka

Kochovu křivku poprvé objevil švédský matematik Helge von Koch. Tato křivka je jedna z prvních popsanych fraktálových křivek. Znamější je jako součást Kochovy vločky (obr. 2.3), vytvořené ze tří spojených Kochových křivek. Kochova křivka vznikne nekonečným opakováním jednoduchého postupu. Na začátku je prostá úsečka. V každém kroku se pak provede následující:

- úsečka se rozdělí na třetiny,
- nad prostřední třetinou se sestrojí rovnostranný trojúhelník,
- základna trojúhelníku (bývalá prostřední třetina úsečky) se odstraní.

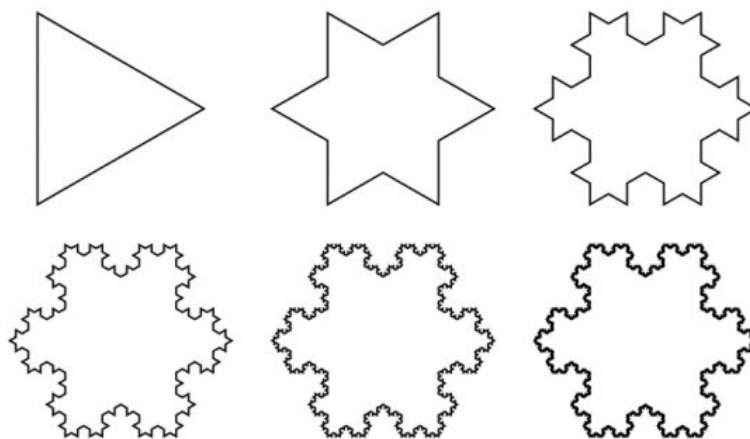
Díky tomu se z původní úsečky stane křivka složená ze čtyř úseček nebo také můžeme říci, že se z trojúhelníku stane šesticípá hvězda a postup se rekurzivně opakuje s každou takto vzniklou úsečkou. Postup znázorňuje obrázek 2.3 a 2.4.



Obrázek 2.3: Vznik Kochovy křivky

Tento druh křivky je hojně využíván jako jedna z možností pro sestavení antén. Kochova anténa byla nejprve studována na snížené velikosti čtvrtvlnného monopólu pro nízkofrekvenční aplikace. Je známo, že Kochova geometrie je velmi složitá, a proto je nejspolehlivěji implementována za pomoci tištěných anténních technik (mikropáskových plátů). Anténa je vytištěna na plošný spoj pomocí dielektrického substrátu namísto společného drátu, kde se dbá s přesností na to, aby anténa pracovala na konkrétních pásmech.

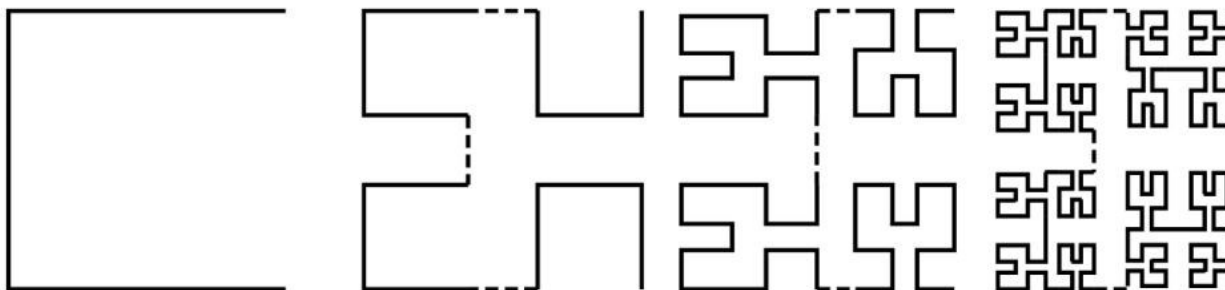
Studie provedené C. Puentem, ukazují, že vstupní odpor se zvyšuje se zvyšující se délkou antény a reakční složky se redukují. Kromě toho, se rezonanční frekvence posouvá k nižším frekvencím, takže dochází k malé rezonanci v dané oblasti antény. Toto chování může být fyzikálně vysvětleno zvýšením počtu ostrých rohů a ohybů, které zvyšují záření antény. [7] [9]



Obrázek 2.4: Šest iterací Kochovy vločky

### 2.3.2 Hilbertova křivka

Hilbertova křivka je fraktálová plochu-vyplňující křivka, jejíž dvourozměrnou variantu jako první popsal německý matematik David Hilbert v roce 1891. Hilbertova křivka má také trojrozměrnou variantu. Několik iterací dvourozměrné varianty Hilbertovy křivky je vidět na obrázku 2.5. I tento druh křivky je možné využít pro konstrukci fraktálové antény.



Obrázek 2.5: Hilbertova křivka – čtyři iterace

### 2.3.3 Minkowského fraktál

Minkowského fraktály byly poprvé zavedeny Hermannem Minkowskim v podobě reprezentace a definice geometrií v roce 1885. Tento motiv je hojně používaným motivem pro sestavení miniaturních antén.

Výchozí tvarem tohoto fraktálu je čtverec. Každá ze čtyř stran čtverce je nahrazena tzv. generátorem. Generátor je přímý úsek rozdělen do tří segmentů, každý segment se rovná jedné třetině délky, počínaje prvním. Prostřední je odebrán ze svého místa a je spojen s dvěma dalšími segmenty (obr. 2.6). Takovéto segmenty jsou vyladěny pro úpravu celkového obvodu fraktálové délky. Tato délka ladění se nazývá šířka odsazení. [8]



Obrázek 2.6: Minkowského fraktál – tři iterace

### 2.3.4 Peanova křivka

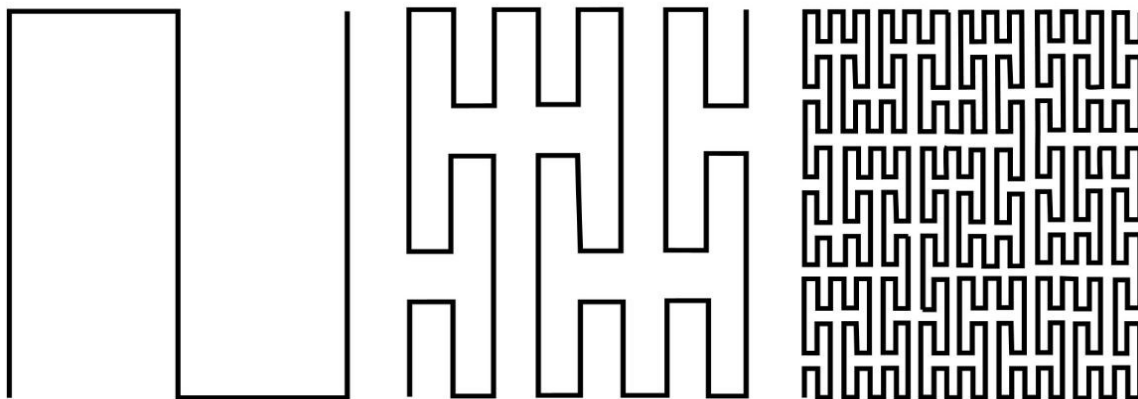
Peanova křivka je křivka vyplňující dvourozměrný prostor. (obr. 2.7) Objevil a popsal ji italský matematik Giuseppe Peano (1858–1932) v roce 1890, inspirován prací Georga Cantora.

Konstrukce takovéto křivky je následující:

- 1. iterace má tvar lomené úsečky, která je lomená dvakrát na jednu stranu a dvakrát na stranu k ní opačnou,
- každá další iterace rozděluje předchozí na  $3 \times 3$  segmenty, do nichž je vložen základní tvar, transformovaný (tj. otočený nebo osově převrácený) podle daného vzoru,

Vlastnosti Peanovy křivky:

- Peanovu křivku lze zkonstruovat rekurzivně,
- nevyplňuje prostor neomezeně,
- nikde se neprotíná,
- je soběpodobná a invariantní vůči měřítku,
- v klasické verzi je bodově symetrická podle svého středu,
- s každou iterací roste počet nových podsegmentů devítinásobně ( $3 \times 3$ ).



Obrázek 2.7: *Peanova křivka*

### 2.3.5 Pythagorův stromový fraktál

Pythagorův strom je rovinný fraktál složený z čtverců. Objeven byl nizozemským matematikem jménem Albert E. Bosman v roce 1942. Je pojmenovaný po slavném matematikovi Pythagorovi, protože každá trojice dotýkajících se čtverců vymezuje pravoúhlý trojúhelník, který je úzce spjat s Pythagorovou větou.

Konstrukce Pythagorova stromu začíná čtvercem. Nad vrchní stranou čtverce se sestrojí dva menší čtverce, jejichž strana je v poměru k původnímu čtverci  $\frac{1}{2\sqrt{2}} : 1$ . Menší čtverce jsou umístěny tak, že hrana původního čtverce a dvou nových, vytyčují pravoúhlý trojúhelník, který má pravý úhel mezi dvěma nově vzniklými čtverci. Tento postup se opakuje na obou nově vzniklých čtvercích rekurzivně, do nekonečna. Na následujících obrázcích jsou první tři iterace (obr. 2.8).



Obrázek 2.8: *Pythagorův stromový fraktál*

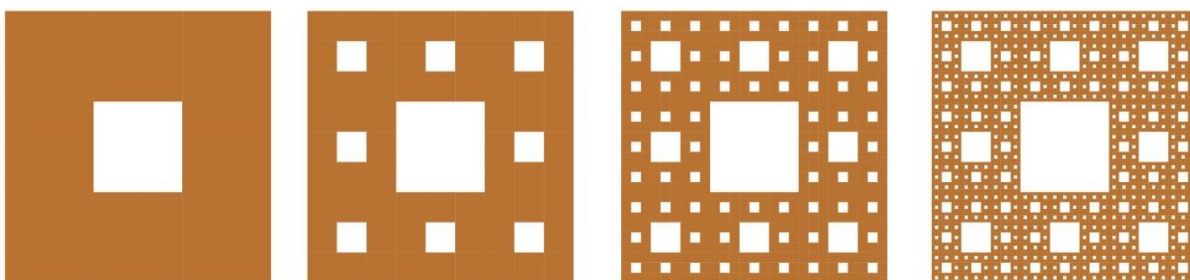


## 2.4 Sierpinského fraktál

V kapitole je popsána jedna z možných variant sestrojení fraktálové antény, a to Sierpinského koberec. Další část je detailněji věnována geometriím a generování Sierpinského trojúhelníku.

### 2.4.1 Sierpinského koberec

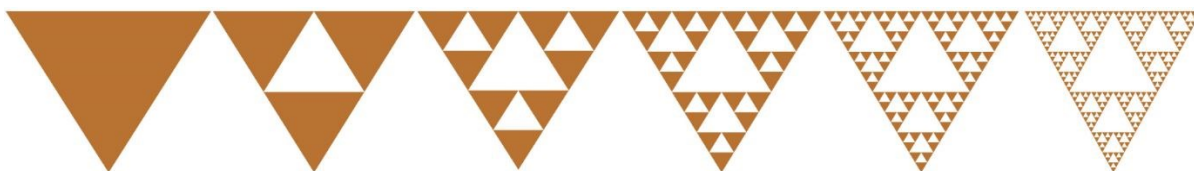
Sierpinského koberec (Sierpinski Carpet) je konstruován analogicky jako Sierpinského trojúhelník, pouze dojde k nahrazení trojúhelníků čtverečky. Aby bylo možné vyrobit tento typ fraktálové antény, musí se začít s jedním čtvercem, který se dále rozdělí na devět dalších čtverečků stejné velikosti a prostřední čtvereček se odstraní. Zbývajících osm čtverečků se znovu rozdělí na devět stejných čtverečků a znovu se prostřední čtvereček odstraní. Takhle můžeme pokračovat stále dokola. Jednotlivé kroky nazýváme iterace. Na obrázku 2.9 jsou vidět kroky popsané výše, jedná se o čtyři iterace.



Obrázek 2.9: Čtyři iterace Sierpinského koberce

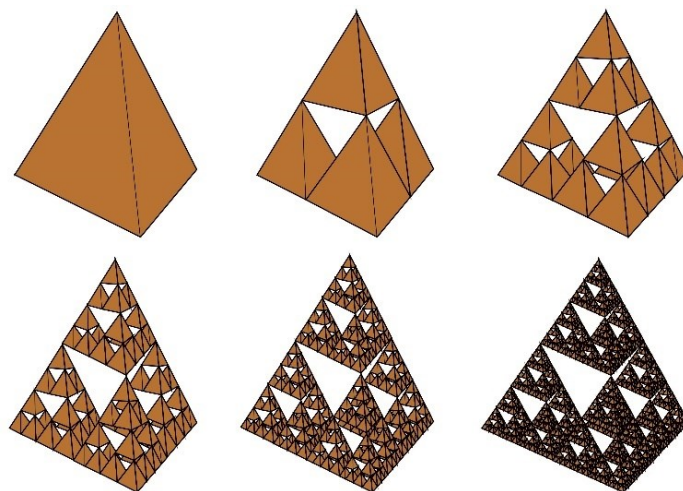
### 2.4.2 Sierpinského trojúhelník

Sierpinského trojúhelník (Sierpinski gasket) je útvar vytvořený rekurzivním vykreslováním rovnostranných trojúhelníků. Jmenuje se tak podle Wacława Sierpinského, polského matematika, který ho v roce 1916 poprvé popsal. Obrázek 2.10 ukazuje šest iterací Sierpinského trojúhelníku, kdy při každé iteraci vzniká nová rezonanční frekvence antény. Existuje i trojrozměrná varianta tohoto fraktálu, která se nazývá Sierpinského pyramida. [8]



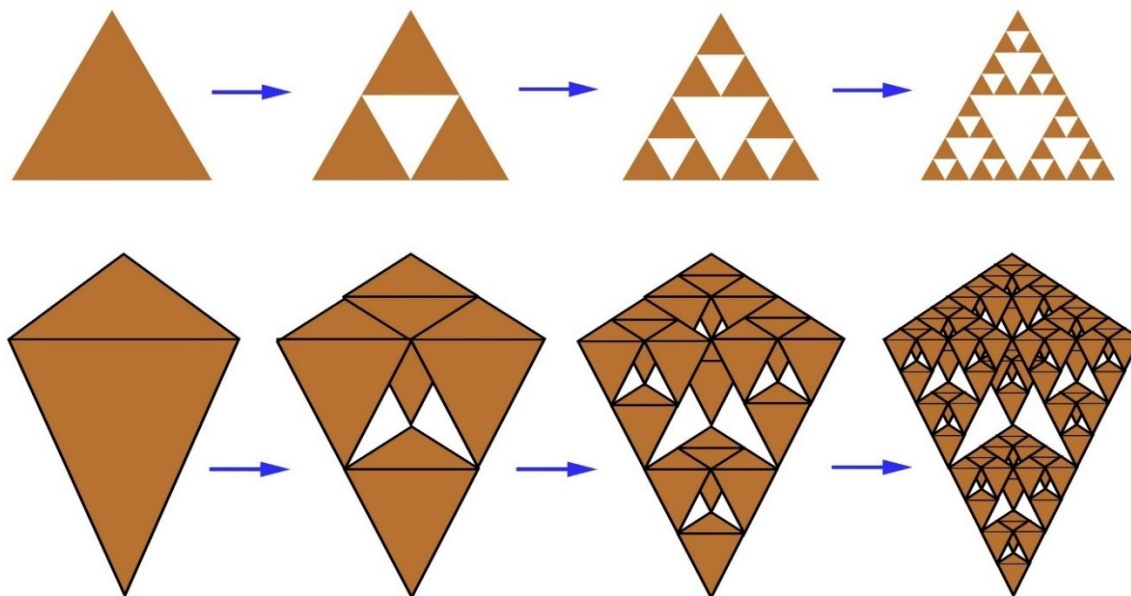
Obrázek 2.10: Pět iterací Sierpinského trojúhelníku

Sierpinského pyramida je trojrozměrný model Sierpinského trojúhelníku. Pyramida je vytvořena z malých pravidelných jehlanů, které jsou uspořádány do Sierpinského trojúhelníkové struktury a dávají vzniknout trojrozměrnému modelu Sierpinského trojúhelníku. Na obrázku 2.11 je zobrazeno šest iterací pyramidy.

Obrázek 2.11: *Sierpinského pyramida*

Sierpinského trojúhelník a pyramidu lze sestavit třemi způsoby. Deterministickým způsobem, metodou chaos game a kopírováním. Jelikož jsou metody analogické jak pro trojúhelníkovou konstrukci, tak i pro pyramidovou konstrukci, je zde popsána varianta konstruování Sierpinského trojúhelníků. Při konstrukci pyramidy se jedná pouze o záměnu trojúhelníku s jehlanem. Existují i varianty, kdy namísto jehlanu můžeme využít kužel. [10]

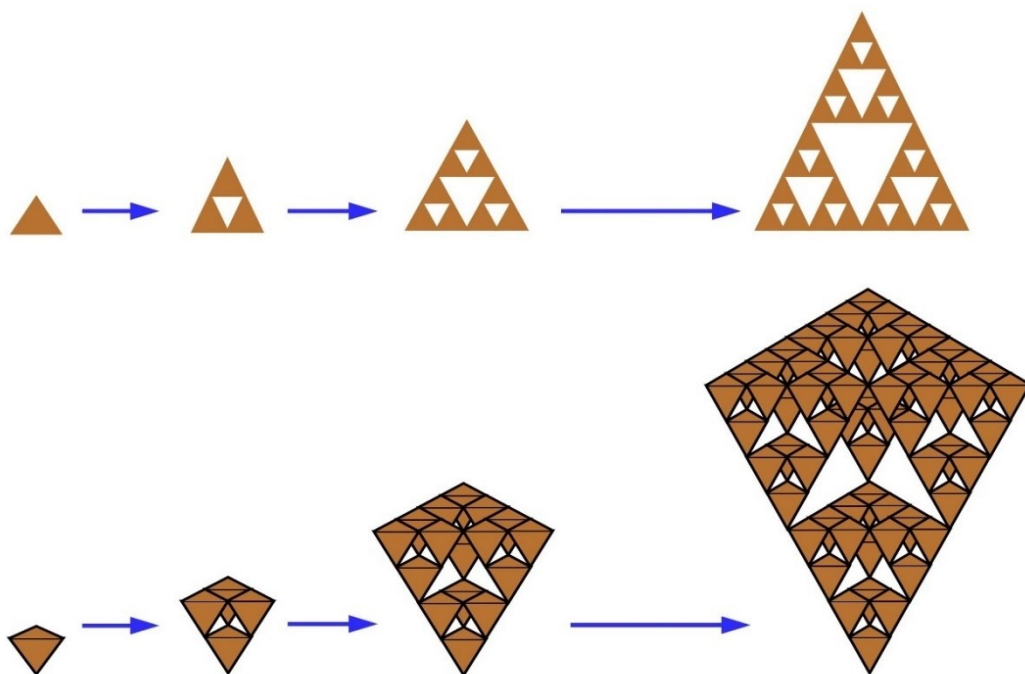
Deterministický způsob výpočtu Sierpinského trojúhelníku nebo také konstrukce rozkladem využívá rovnostranného trojúhelníku. Konstrukce začíná s velkým trojúhelníkem, který tvoří celou geometrii. Cílem je vždy spojit středy stran dohromady a vytvořit dutý prostor ve středu trojúhelníku. Tento proces rozdělí původní trojúhelník na tři zmenšené (poloviční) verze původního trojúhelníku. Stejný proces můžeme opakovat v každém z vytvořených trojúhelníků (obr. 2.12).

Obrázek 2.12: *Konstrukce Sierpinského trojúhelníku a pyramidy rozkladem*

Tvorba Sierpinského trojúhelníku metodou chaos game je naprosto odlišná od deterministického způsobu. Tato metoda vyžaduje sestavení algoritmu, ve kterém stačí zadat jen

vrcholy trojúhelníku. Poté je postupováno dle algoritmu programu. Nejdříve je vybrán jeden vrchol, ze kterého metoda vychází. Spojením vybraného vrcholu s jedním ze dvou vrcholů trojúhelníku se vytvoří přímka, která se následně rozdělí na dvě poloviny. Dělicí bod přímky je umístěn v jejím středu, čímž je získán bod, který je vstupem pro další iteraci. Opakováním tohoto algoritmu je vytvářen požadovaný počet iterací [10].

Vytvoření geometrie Sierpinského trojúhelníku kopírováním je vysvětlena na obrázku 2.13. I když geometrie uvedená na obrázku se skládá z rovnostranných trojúhelníků, popis platí pro všechny trojúhelníkové geometrie. Při konstrukci začínáme s malým trojúhelníkem. Vytvoříme další dva trojúhelníky stejné velikosti a připojíme k původnímu trojúhelníku. Tento proces může mít  $n$  opakování, kde  $n$  je řád iterace. [10]



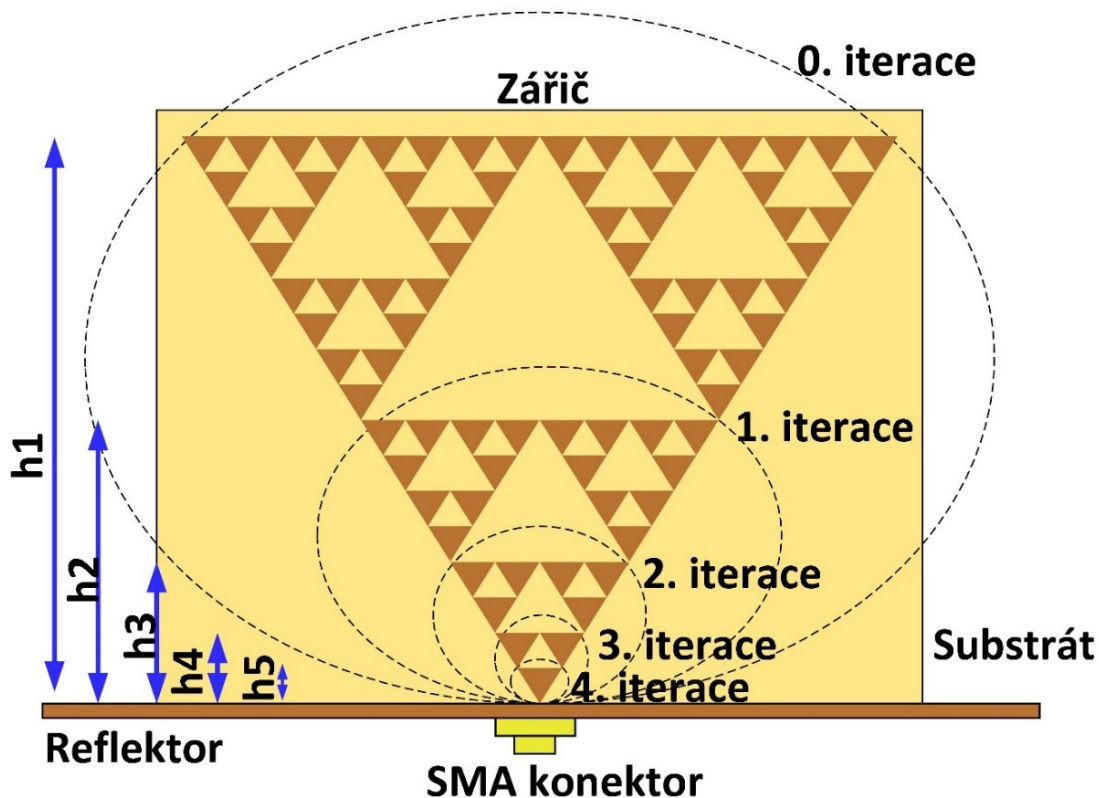
Obrázek 2.13: Konstrukce Sierpinského trojúhelníku a pyramidy kopírováním

### 2.4.3 Sierpinského trojúhelníková anténa

Jelikož je Sierpinského motiv nejvíce studovanou fraktálovou geometrií a nejčastěji využívanou konstrukcí v anténní technice, je vhodné zvolit tento druh fraktálu pro konstrukci antény v této práci. Stejně jako u Kochova fraktálu lze říci, že i Sierpinského trojúhelník je nejspolehlivěji realizován za pomoci tištěných anténních technik (mikropáskových plátů). Soběpodobnost fraktálu způsobuje možnost ovlivnit vícepásmovou povahu těchto antén. Jednotlivá kmitočtová pásma přímo úměrně závisí na počtu iterací daného trojúhelníku. Počet iterací se rovná počtu získaných kmitočtových pásem. Počítá se i 0. iterace, ale její pásmo zůstává často nevyužito. Důvodem je obtížné přizpůsobování antény v pásmu tvořeného 0. iterací. Charakteristiku pásma ovlivňují i tyto parametry: variace úhlů, vzdálenost zářiče od reflektoru či naklonění geometrie antény. Vícepásmovou povahu antény lze velmi dobře využít při kvalitně optimalizované struktuře, použití vysoce dielektrického substrátu a absorpčního materiálu, což zapříčiní, že anténa vykazuje širokopásmové vlastnosti. [4] [11]

V anténní technice jsou vlastnosti Sierpinského trojúhelníku využívány zejména u mikropáskových antén (obr. 2.14). Mezi hlavní výhody antén patří:

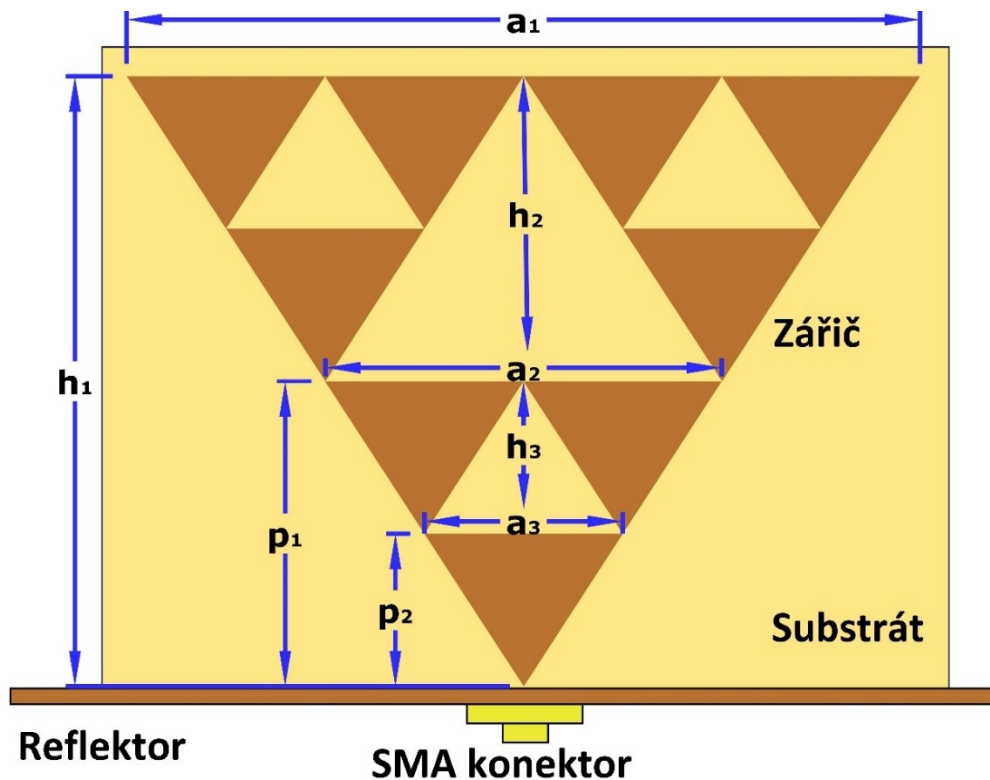
- nízký profil,
- nízká cena,
- kompaktní rozměry,
- vícepásmové kmitočtové možnosti,
- slučitelnost s PCB technologií, která zaručuje jednoduché a levné výrobní možnosti.



Obrázek 2.14: Zobrazení iterací Sierpinského trojúhelníkové antény realizované na desku plošného spoje

V kapitole 2.4.2 bylo popsáno generování a geometrie Sierpinského trojúhelníku a pyramidy. Nyní je však nutné popsat rozměry a výpočet konstrukce antény. Obecný výpočet si ukážeme na modelu 2. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény s reflektorem. Na obrázku 2.15 jsou vyznačeny rozměry, které jsou předmětem výpočtu a modelování konstrukce antény.

Rozměry  $p_1$  a  $p_2$ , tvoří umístění podstav. Dále  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  znázorňují délky stran a hodnoty  $h_1$ ,  $h_2$  a  $h_3$  poukazují na výšky trojúhelníků jednotlivých iterací. Na obrázku jsou vyznačeny i části konstrukce antény, jimiž jsou: SMA konektor, substrát, záříč a reflektor. Uvedené rozměry jsou předmětem ukázky obecných výpočtů antény. Přičemž se především věnují výpočtům anténních parametrů, jako jsou: rezonanční frekvence a skinefekt.



Obrázek 2.15: Rozměry 2. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény

Výšky  $h$  každého dílčího trojúhelníku jsou určeny z rezonančních frekvencí antény. To znamená, že budeme mít tři různá pásma, pokud máme tři různé výšky trojúhelníků. Změnou měřítka, budeme mít jiná maxima každého dílčího trojúhelníku a tím pádem budou i jiná frekvenční pásma. [6]

Chceme-li zjistit odhad rezonančních frekvencí Sierpinského trojúhelníkové antény, použijeme rovnici, která je dána vztahem: [12]

$$fr = k \frac{c}{h_s} \cos(\alpha/2) (\delta)^n \quad (2.1)$$

Tuto rovnici je možné zjednodušit na následující tvar: [12]

$$fr = 0,26 \frac{c}{h_s} (\delta)^n \quad (2.2)$$

Odvozením je možné získat vztah pro výpočet výšky  $h_s$  trojúhelníku za pomoci potřebné rezonanční frekvence  $fr$ .

$$h_s = \frac{0,26 \cdot c \cdot (\delta)^n}{fr} \quad (2.3)$$

Kde:

- $fr$  rezonanční frekvence,
- $k$  konstanta dané typem materiálu (nejčastěji 0,152) [12],
- $c$  rychlost světla ve vakuu,

- $h_S$  velikost největšího trojúhelníku Sierpinského motivu,  
 $\alpha$  vnitřní úhel trojúhelníku ( $60^\circ$ ),  
 $\delta$  periodičita (vztah 2.4),  
 $n$  počet iterací.

Přičemž hodnota  $k$  je konstanta, která je dána tloušťkou a typem dielektrického materiálu. Nejčastěji používaná hodnota  $k = 0,152$  [12]. Dále úhel  $\alpha$  je vnitřní úhel trojúhelníku, tedy  $60^\circ$ .

Periodičita je určena výškou každého dílčího trojúhelníku a je dána vztahem:

$$\delta = \frac{h_n}{h_{n+1}} \quad (2.4)$$

Kde:

- $h$  výška trojúhelníku,  
 $n$  počet iterací.

Výsledkem periodičity pro Sierpinského trojúhelník je vždy číslo 2.

Jelikož se u Sierpinského trojúhelníku jedná o rovnostranný trojúhelník, lze při znalosti výšky  $h$  vypočítat délku strany  $a$  podle následujícího vztahu uvedeného v rovnici 2.5. Celý vztah je odvozen z Pythagorovy věty.

$$a = \frac{h \cdot 2}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

Naopak při znalosti délky strany trojúhelníku, můžeme získat odvozením vztahu výšku trojúhelníku  $h$ .

$$h = \frac{\sqrt{3} \cdot a}{2} \quad (2.6)$$

Kde:

- $h$  výška základního trojúhelníku (0. iterace),  
 $a$  délka strany trojúhelníku.

Při praktické realizaci antén tohoto typu je nutné do výpočtů zahrnout i skinefekt. Je to fyzikální děj, při kterém dochází k vytlačování elektrického proudu k povrchu vodiče. [13]

Skinefekt je popsán hloubkou vniku  $\delta$  (2.7).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (2.7)$$

Kde:

- $\delta$  hloubka vniku,

- $\omega$  úhlová rychlost proudu =  $2\pi f$ ,
- $\mu$  permeabilita vodiče,
- $\sigma$  elektrická konduktivita materiálu antény.

Tento výpočet u Sierpinského trojúhelníkové antény určí minimální vrstvu mědi plošného spoje.

## 2.5 Stanovení cílů a kritérií optimalizace fraktálové antény

Optimalizace antén je praktické nebo simulační experimentování s tvary a rozměry antén. Cílem optimalizace je dosáhnout předem daných cílů či účelových funkcí, které nabývají minima nebo maxima hodnot. U antén jsou jimi například: širokopásmovost, přizpůsobení antény, rezonance na daných frekvencích apod. Těchto cílů je možné dosáhnout: změnou výšky a šířky motivu zářiče, změnou výšky zářiče od reflektoru, změnou velikosti reflektoru, přidáním či změnou tvaru zářiče a mnoha dalšími experimenty, které se odvíjí od typu antén.

Cílem diplomové práce je provést optimalizaci vzhledem k širokopásmovosti fraktálové antény. Optimalizaci je zde možné provádět za pomoci změn tvarů, úhlů a počtu fraktálových motivů nebo také experimentováním s velikostí reflektoru a výškou zářiče antény od reflektoru. Právě přidáváním, respektive iterováním tvaru fraktálu, dochází k větší širokopásmové charakterizaci antény. Různými změnami těchto tvarů je nutné vyladit si anténu na potřebné rezonanční frekvence. Je možné provádět testování přidáváním dalších možných tvarů struktur, například na místo reflektoru, či substrátu. Optimalizaci praktických modelů fraktálových antén vzhledem k širokopásmovosti se věnuje kapitola 3.

Existují i různé metody optimalizace založené na optimalizačních algoritmech. V anténní technice je nejpoužívanější algoritmus Nelder Mead Simplex. Tento algoritmus je implementován i v CST Microwave Studiu. Detailnějšímu popisu tohoto algoritmu a jeho využití při optimalizaci se více věnují kapitoly 3.3.2 a 3.3.3.



### 3 Návrh, simulace a optimalizace fraktálových antén

Tato část je věnována návrhu Sierpinského trojúhelníkové antény, simulacím a její následné optimalizaci pro dosažení co největší možné širokopásmovosti antény. Dále je snahou provést experimentální simulace za účelem větší širokopásmovosti. Simulace jsou prováděny v programu CST Microwave Studio, který je přiblížen v následující kapitole.

#### 3.1 CST Microwave Studio

CST Microwave Studio je specializovaný program určený zejména pro vysokofrekvenční aplikace. Využívá numerických metod k elektromagnetické analýze vysokofrekvenčních struktur, antén, vlnodů apod. Pracuje v časové a kmitočtové oblasti. Pro simulace využívá několika výpočetních způsobů tzv. „solverů“. Každý z nich je určen pro jinou specifickou operaci. Při špatné volbě techniky řešení se mohou u simulací vytvořeného objektu vyskytnout značné nepřesnosti.

#### 3.2 Návrh Sierpinského trojúhelníkové antény

Předmětem kapitoly je názorný výpočet rozměrů antény. Obecný výpočet návrhu je uveden v kapitole 2.4.3. Z těchto vztahů budeme vycházet.

Počáteční 0. iterace využívá velikost největšího trojúhelníku Sierpinského motivu  $h = 88,9 \text{ mm}$ , tudíž délka strany trojúhelníku  $a = 102,653 \text{ mm}$  (vztah 2.5). Hodnoty jsou doporučovány, jakožto rozměrově optimální pro počáteční simulace. Výšky a délky dalších stran trojúhelníku je možné vypočítat vždy půlením trojúhelníku předchozího či za pomoci následujících výpočtů.

Nyní je zde proveden ukázkový výpočet rozměrů Sierpinského trojúhelníkové antény pro 3. iteraci, při zvolené počáteční výšce antény  $h = 88,9 \text{ mm}$ .

Při znalosti výšky využijeme vztah 2.2, který slouží pro výpočet rezonanční frekvence na dané iteraci. Vztah však obsahuje hodnotu periodicity  $\delta$ , kterou je nutné si nejprve vypočítat ze vztahu 2.4.

$$\delta = \frac{h_n}{h_{n+1}} = \frac{h_3}{h_{3+1}} = \frac{\left(\frac{h}{8}\right)}{\left(\frac{h}{16}\right)} = \frac{\left(\frac{88,90}{8}\right)}{\left(\frac{88,90}{16}\right)} = \frac{11,11}{5,56} \cong 2$$

Hodnota  $h_n$  je závislá na dané iteraci. Pokud se bude jednat o 0. iteraci bude hodnota rovna  $h$  (88,9 mm). Ukázkový výpočet je pro 3. iteraci, tudíž je nutné provést podíl celkové hodnoty výšky  $h$  s hodnotou počtu rozdělení původního trojúhelníku (1. iterace -  $\frac{h}{2}$ , 2. iterace -  $\frac{h}{4}$ , 3. iterace -  $\frac{h}{8}$ , 4. iterace -  $\frac{h}{16}$ ). Výška největšího trojúhelníku při 3. iterace je:  $h_3 = \frac{h}{8} = \frac{88,9}{8} = 11,11 \text{ mm}$ .

Po provedení výpočtu periodicity je možné přikročit k zjištění odhadu hodnot rezonanční frekvence (vztah 2.2) pro 3. iteraci Sierpinského trojúhelníkové antény.

$$fr = 0,26 \frac{c}{h_c} (\delta)^n = 0,26 \cdot \frac{3 \times 10^8}{88,9 \times 10^{-3}} \cdot (2)^3 = 7,019 \text{ GHz}$$

Zde je nutno podotknout výpočet, jestliže neznáme výšku trojúhelníku, ale máme požadovanou rezonanční frekvenci. Pokud požadujeme, aby anténa rezonovala například na rezonanční frekvenci



2,4 GHz použijeme vztah 2.3. Je však nutné zvolit vhodnou iteraci. Platí pravidlo, že nízké hodnoty rezonančních frekvencí se dávají na nižší hodnoty iterací. [8]

$$h = \frac{0,26 \cdot c \cdot (\delta)^n}{f_r} = \frac{0,26 \cdot (3 \times 10^8) \cdot (2)^2}{2,4 \times 10^9} = 65 \text{ mm}$$

Výška největšího trojúhelníku 2. iterace pro rezonanci 2,4 GHz by musela být 65 mm. To znamená, že fraktál 2. iterace se bude skládat z devíti trojúhelníků o vypočítané výšce. Pokud však požadujeme více konkrétních rezonancí pro daný model antény, je nutné provést optimalizaci za pomoci optimalizačních metod (kapitola 2.5).

Nyní se však vrátíme k předchozímu výpočtu. Při znalosti výšky trojúhelníku antény, můžeme za pomoci Pythagorovy věty dopočítat délku strany největšího trojúhelníku u 3. iterace (vztah 2.5).

$$a_3 = \frac{h_3 \cdot 2}{\sqrt{3}} = \frac{11,11 \cdot 2}{\sqrt{3}} = 12,829 \text{ mm}$$

Výsledky jsou: výška největšího trojúhelníku 3. iterace  $h_3 = 11,11 \text{ mm}$  a délka strany největšího trojúhelníku  $a_3 = 12,829 \text{ mm}$ . Výsledků nově vzniklých iterací můžeme jednoduše dosáhnout i při pouhém půlení stran a výšek původní velikosti prvního trojúhelníku. Následující tabulka 3.1 zobrazuje hodnoty výsledků rezonančních frekvencí, výšky trojúhelníků a délky stran pro dané iterace. Výpočty zobrazených hodnot jsou prováděny analogicky pro každou iteraci.

Tabulka 3.1: Rozměry šesti iterací Sierpinského trojúhelníkové antény

Iterace $n$	$f_r$ [GHz]	$h$ [mm]	$a$ [mm]
0.	0,877	88,900	102,654
1.	1,755	44,450	51,328
2.	3,510	22,225	25,664
3.	7,019	11,113	12,832
4.	14,038	5,5565	6,416
5.	28,077	2,778	3,212
6.	56,153	1,389	1,606

Při praktické realizaci antény tohoto typu je nutné do výpočtů zahrnout i skinefekt, který je popsán hloubkou vniku  $\delta$  (vztah 2.7).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 0,877 \times 10^9 \cdot 4\pi \times 10^{-7} \cdot 58,108 \times 10^6}} = 2,23 \text{ } \mu\text{m}$$

Kde  $\omega = 2\pi f$ . Frekvence  $f$  je zvolena jako nejnižší rezonanční frekvence antény. Hodnota  $\mu$  je permeabilita ve vakuu a  $\sigma$  je hodnota konduktivity mědi. Tento výpočet u Sierpinského trojúhelníkové antény určuje minimální vrstvu mědi plošného spoje.

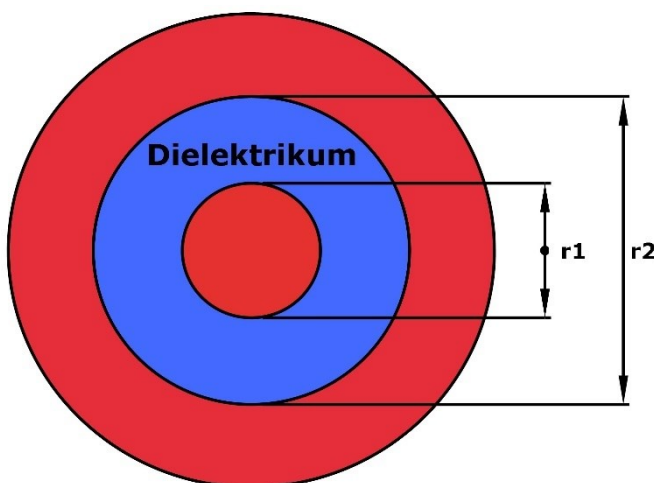
Další nedílnou součástí konstrukce antény je konektor. U návrhu v CST Microwave Studiu byl použit koaxiální konektor, který je tvořen dielektrikem z teflonu. Konektor byl přizpůsoben na impedanci  $50 \text{ } \Omega$ , která se běžně používá v anténní technice jako napáječ přijímací i vysílací antény. Pro vnitřní a vnější vodič konektoru byl při modelování v CST Microwave Studiu zvolen materiál PEC (Perfect Electric Conductor), což je dokonalý elektrický vodič.

Princip výpočtu charakteristické impedance použitého konektoru je znázorněn na obrázku 3.1. Samotný výpočet je uveden ve vztahu 3.1. Použito je zde dielektrikum z teflonu (PTFE) s relativní permitivitou  $\epsilon_r = 2,1$ .

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \cdot \frac{r_2}{r_1} = \frac{60}{\sqrt{2,1}} \cdot \ln \cdot \frac{2,124}{0,635} = 50\Omega \quad (3.1)$$

Kde:

- $Z$  charakteristická impedance konektoru,
- $\epsilon_r$  relativní permitivita teflonu,
- $r_2$  poloměr dielektrika,
- $r_1$  poloměr vnitřního vodiče.



Obrázek 3.1: Parametry SMA konektoru

### 3.3 Simulace a optimalizace fraktálových antén

#### 3.3.1 Simulace v CST Microwave Studiu

Tato část se věnuje simulacím a optimalizaci Sierpinského fraktálu. U všech simulací byl vždy zvolen "frequency domain solver" a rozsah frekvence 0 až 12 GHz. Pro názornou ukázkou práce se simulačním programem následuje zjednodušený popis postupů konstrukce jednoduché struktury Sierpinského trojúhelníkové antény.

Po spuštění CST Microwave Studia se zobrazí okno create project. Nejprve vybereme, zda chceme využít existující příklad nebo simulovat zcela od počátku, zvolíme simulaci od počátku. Dále vybereme MW & RF & Optical – Antennas – Planar. Vyskytne se nám možnost vybrat mezi již zmiňovanými „time domain solver“ a „frequency domain solver“. Zvolíme „frequency domain solver“. Touto volbou se automaticky nastaví rozměry v mm, frekvence v GHz, teplota v Kelvíněch, background properties jsou automaticky nastaveny na normal ( $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_0 = 1.0$ ) a v okně boundary conditions se

automaticky nastaví všechny parametry na open (add space). Můžeme nastavit i rozpětí min. a max. frekvence, zvolíme 0–12 GHz. Nyní je již vše připraveno k samotné simulaci antény.

Sierpinského trojúhelníková anténa je složena ze zářiče, reflektoru a konektoru. Nejdříve je nutné zvolit si materiál ze kterého budou části antény tvořeny. U reflektoru vybereme materiál hliník a u zářiče měď. Reflektor je umístěn kolmo k zářiči antény. Konektor je tvořen z teflonu, kdy však stínící a středový vodič je opět vytvořen z materiálu PEC (obr. 3.1). Koaxiální konektor je přizpůsoben na 50  $\Omega$  (vztah 3.1).

Při modelování antény byly nejdříve zkonstruovány výše požadované struktury. Program je v tomto ohledu intuitivní, modelování jednodušších struktur jde snadno a rychle. Postup návrhu je následující. Nejprve se vytvoří substrát kliknutím na ikonu create brick a stiskem klávesy ESC se zobrazí okno brick, které slouží pro vytvoření obdélníku. Zde se zadají rozměry desky pro substrát. Nastavené hodnoty zadaných parametrů je možné předběžně kontrolovat ve 3D prostředí a to tlačítkem preview. Pokud jsme spokojeni se zadanými parametry, zvolíme tlačítko OK, kdy dojde k vytvoření substrátu. Rozměry objektů se obecně zadávají parametricky tak, aby se daly jednoduše měnit a hlavně, aby mohly být později pohodlně aplikovány optimalizační metody. Nyní můžeme přistoupit k samotné konstrukci trojúhelníkového zářiče. Trojúhelník je možné vytvořit funkcí extrude, kde znovu, jako u funkce brick, zadáme parametry potřebné konstrukce pro osy x, y a z. Je nutno zvolit i tloušťku pokovení a materiál. U 0. iterace trojúhelníku postačí vytvořit jeden jediný trojúhelník o dané výšce, avšak pro další iterace Sierpinského trojúhelníku je jednodušší začít konstrukci antény od nejmenšího trojúhelníku, tedy metodou kopírování (Obr 2.12). Pro konstrukci metodou kopírování využijeme již zmíněnou funkci extrude. Vytvoříme si nejmenší trojúhelník dané iterace (výpočet dle vztahu 2.3, 2.5) a použijeme funkci translate, která slouží pro kopírování prvku na zadanou pozici. V okně translate zvolíme možnost copy a zadáme potřebné souřadnice pro kopírování konstrukce na vyžadované body, tudíž na vrcholy trojúhelníků. Vznikne nám dvojnásobně velký trojúhelník s výřezem trojúhelníku uprostřed neboli Sierpinského trojúhelník 1. iterace. Abychom mohli tyto kroky opakovat s nově vzniklým trojúhelníkem, je zapotřebí použít funkce boolean – add, kde provedeme označení všech vzniklých trojúhelníků a aplikujeme funkci. Nyní vznikne jeden celek, který můžeme znovu opakovaně kopírovat a stejným postupem, jako byl nyní popsán, můžeme dosáhnout vysokého počtu iterací, díky poměrně jednoduchým krokům.

Je nutné ještě vytvořit reflektor, který bude kolmo na modelovaný zářič. Vytvoření reflektoru je analogické jako u substrátu. Materiál zvolíme hliník.

Posledním krokem konstrukce je vytvoření konektoru. Modeluje se pomocí funkce circular cylinder. Znovu jsme vyzváni k zadání parametrů velikosti a materiálu. Při vytváření dielektrika je zvolen materiál teflon PTFE (loss free), který je možné načíst z knihovny (load from material library). Po vytvoření dielektrika se při střetu dvou různých materiálů objeví okno shape intersection, ve kterém se pro zvýraznění dielektrika zvolí insert highlighted shape. Vytvoření středního a stínícího vodiče je obdobné jako u dielektrika s tím rozdílem, že je použit materiál PEC, čímž nedochází ke konfrontaci dvou různých materiálů. Je ještě nutné definovat vlnovodný port na konektoru. Nastavení portu se provede výběrem ikony select point, edge or face. Následným dvojklikem se vybere plocha, na kterou se port nastaví, vybereme stínění konektoru. Volbou waveguide ports a následným potvrzením se port nastaví. Nyní máme namodelovanou Sierpinského trojúhelníkovou anténu s reflektorem, substrátem a konektorem.

V dalším kroku je nutné nastavit okrajové podmínky pro každou stěnu "open (add space)" a vybrat roviny symetrie, pokud v dané struktuře nějaká symetrie byla. Jelikož byla anténa konstruována, tak aby bylo možné využít symetrii, zvolíme v záložce symmetry planes symetrii v osách XY a YZ na hodnotu magnetic ( $H_t = 0$ ). Je nutné nastavit i "mesh type", u každé struktury vybereme "tetrahedral". Toto nastavení určuje rozložení diskretních bodů, ve kterých se počítá elektromagnetické pole. Čtyři sousední body v prostoru tvoří jeden tetrahedron (čtyřstěn). Za pomoci již zmíněné symetrie snížíme počet potřebných tetrahedronů o polovinu a tím snížíme i případný čas výpočtu simulování. Nakonec se nastavují vlastnosti simulace "frequency domain solver", jako je přesnost, počet frekvenčních vzorků, či adaptivní "mesh". Je možné provést různé sledování parametrů jako je vyzařovací diagram na určité frekvenci, nebo provést tzv. sweep parametru antény apod. Samotný start simulace provedeme tlačítkem setup solver. Vytvořené modely v softwaru CST Microwave Studio jsou součástí elektronické přílohy s názvy: Antena\_pyramida.cst, Antena\_trojuhelnik.cst.

### 3.3.2 Optimalizace Sierpinského trojúhelníkové antény

Optimalizaci jsem započal postupnou analýzou a výběrem vhodné iterace Sierpinského motivu. Cílem je vybrat iteraci, při které bude docházet k co možná největšímu počtu rezonancí na měřeném frekvenčním rozsahu. Po výběru vhodné iterace jsem přikročil k analyzování vlivů změn rozměrů trojúhelníku a velikosti reflektoru. Analýza byla prováděna zejména pro získání potřebných poznatků o chování antény. Vzhledem k dosažení širokopásmovosti antény, byla provedena optimalizace optimalizačním algoritmem.

Pro úspěšnou analýzu iterování je nutné započít s popisem vlastností a porovnáním výsledků všech vzniklých iterací, zejména porovnáním vstupního činitele odrazu. Kritériem pro volbu ideální iterace je počet rezonančních frekvencí a optimální velikost modelu. Následně jsou u vybrané iterace sledovány parametry: vstupní činitel odrazu, zisk a směrové charakteristiky. Postup konstrukce iterací antény a všech následujících iterací je analogický jako v kapitole 3.3.1. Pro základní modelaci všech iterací byla zvolena již zmiňovaná výška největšího z trojúhelníků 88,9 mm a délka strany trojúhelníku 102,654 mm. Modelace byla provedena metodou kopírování.

První vzniklou iterací pro Sierpinského trojúhelníkovou anténu je 0. iterace. Iterace se skládá pouze z jednoho hlavního trojúhelníku (obr. 3.2). Dává vzniknout první rezonanční frekvenci a to 0,877 GHz. Rezananční frekvence by byla využitelná například pro technologii Globálního Systému pro Mobilní komunikace. Ovšem v praxi se většinou iterace moc nepoužívá, pro nutnost využití přízpusobovacího členu.

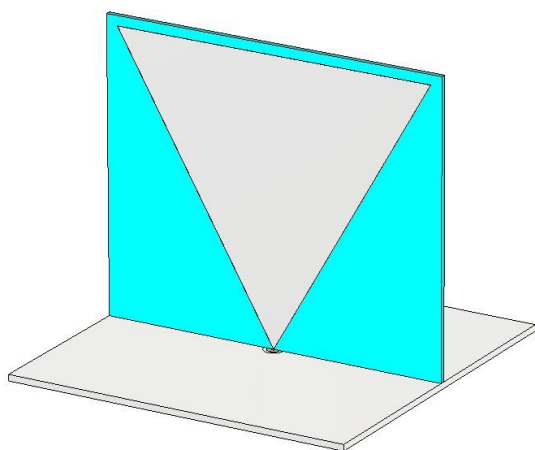
Další konstrukcí je 1. iterace (obr. 3.3). Je složena z jednoho hlavního a jednoho vnitřního trojúhelníku. Vnitřní trojúhelník je o poloviční velikosti k původnímu trojúhelníku. Vzniká další rezonanční frekvence, a to 1,755 GHz. Opět je možné frekvenci využít například pro technologie Globálního Systému pro Mobilní komunikace. Nyní anténa vykazuje dvě rezonanční frekvence, je zde názorně vidět, jak iterace ovlivňují vznik těchto rezonancí, a tak i širokopásmovost antény.

Přikročíme ke konstrukci 2. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény (obr. 3.4). Konstrukce je tvořena dalšími třemi zmenšenými trojúhelníky oproti předešlé 1. iteraci. Vzniká třetí rezonanční frekvence 3,510 GHz.

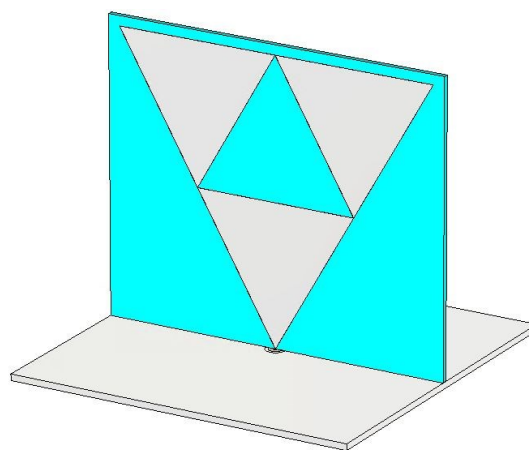
U 3. iterace je konstrukce složena dalším přidáním zmenšených trojúhelníků (obr. 3.5). Kdy iterace vytváří již čtvrtou rezonanční frekvenci na hodnotě 7,019 GHz.

Následuje 4. iterace (obr. 3.6), 5. iterace (obr. 3.7) a 6. iterace (obr. 3.8). Tyto iterace dávají vzniknout dalším rezonančním frekvencím a to 14; 28 a 56 GHz. Graf vstupního činitele odrazu všech šesti iterací je součástí přílohy (příloha A, obr. A.1).

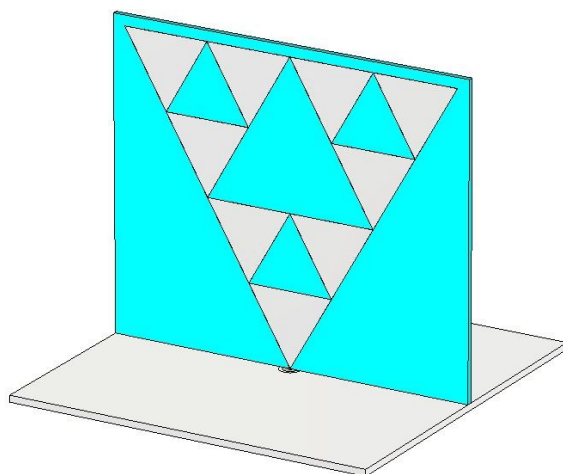
Nejvhodnější iterací antény byla zvolena 4. iterace. Volba je zapříčiněna následujícími faktory. Nejzásadnějším faktorem je počet rezonančních frekvencí a to pět. Tyto frekvence se již s narůstajícím iterováním pouze opakují a vznikají nové, příliš vysoké rezonanční frekvence na neatraktivních frekvenčních pásmech, jako je např.: 28 a 56 GHz. To je první důvod proč již nevyužívat vyšší iterace. Dalším důvodem je postupné snižování velikosti vzniklých trojúhelníků. Velikost trojúhelníků se pohybuje v desetinách milimetrů a bylo by příliš složité anténu zkonstruovat s dostatečnou přesností. Hodnoty rozměrů a rezonančních frekvencí u 4. iterace jsou vhodné pro následnou optimalizaci a výrobu modelu antény.



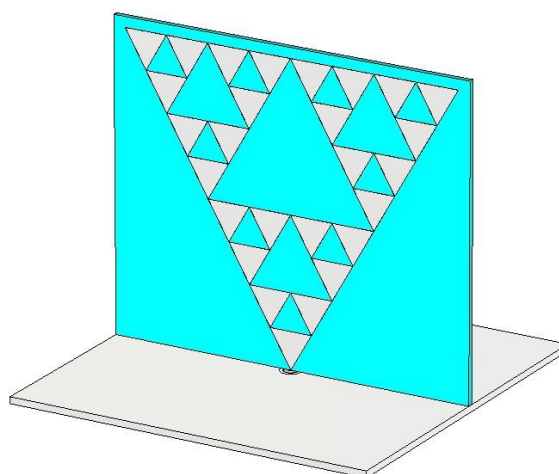
Obrázek 3.2: 0. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény



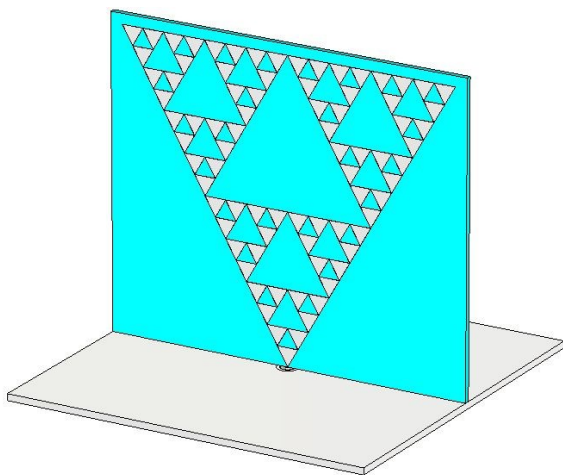
Obrázek 3.3: 1. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény



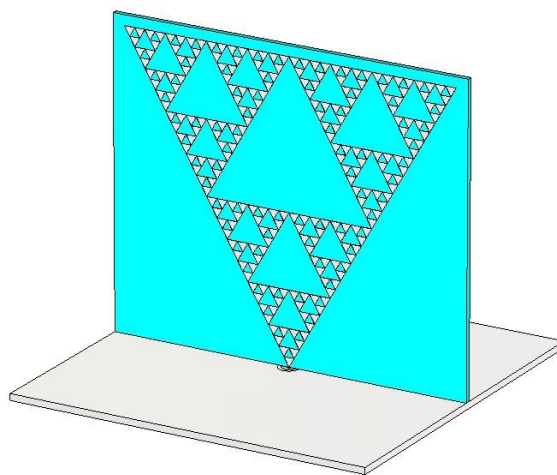
Obrázek 3.4: 2. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény



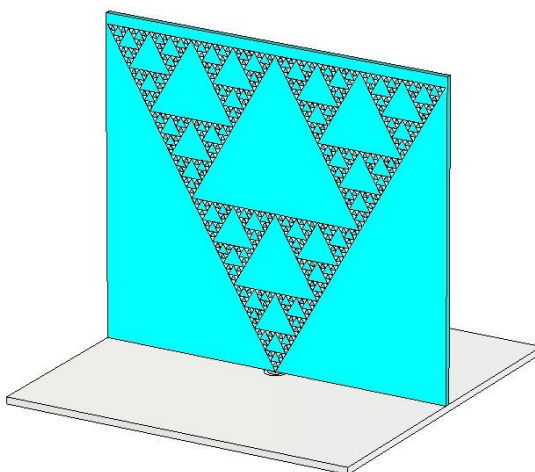
Obrázek 3.5: 3. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény



Obrázek 3.6: 4. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény

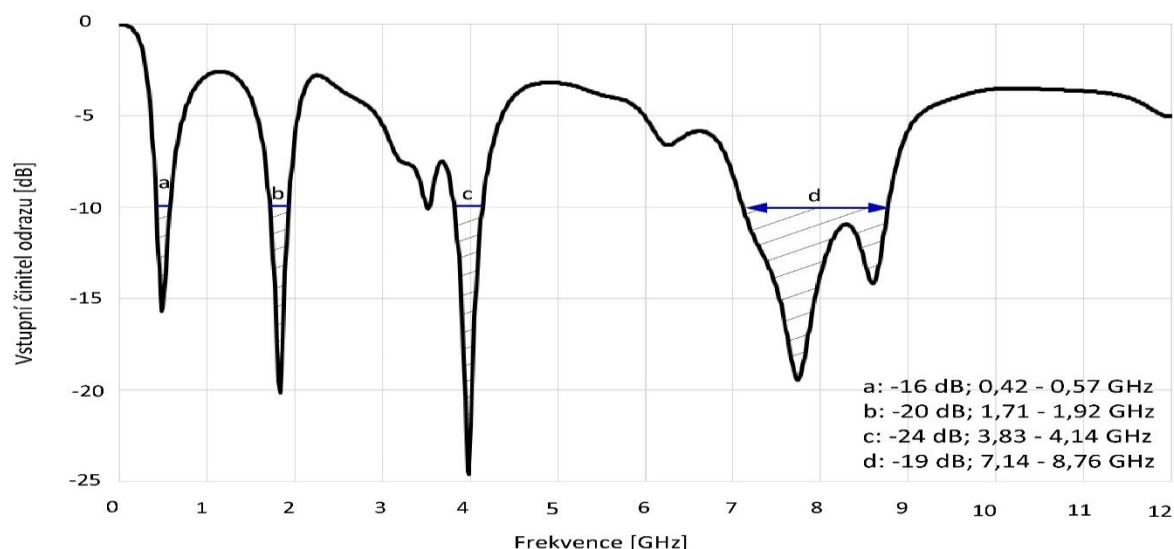


Obrázek 3.7: 5. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény



Obrázek 3.8: 6. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény

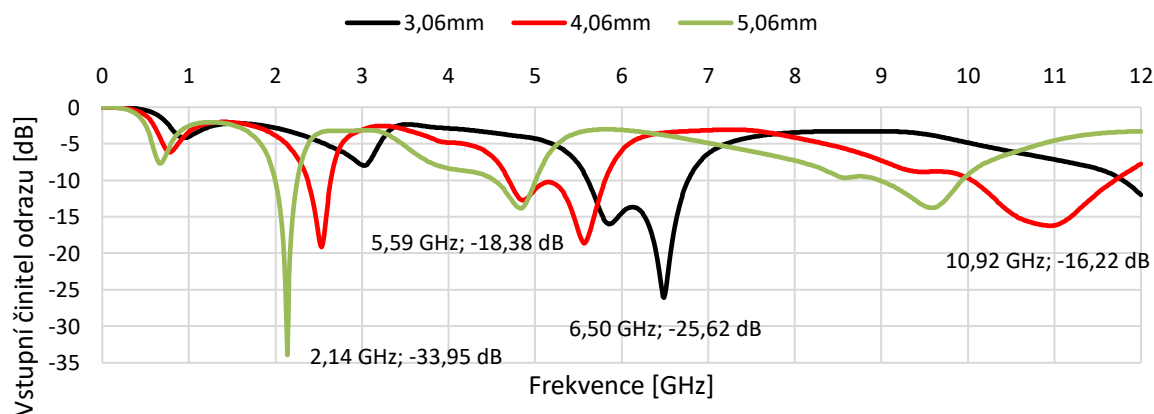
Vybraná iterace při konstrukci výšky největšího počátečního trojúhelníku 88,9 mm, délce strany 102,654 mm a konstrukci nejmenších trojúhelníků o výšce 5,556 mm a délce stran 6,423 mm vykazuje pět rezonančních frekvencí 0,486; 1,831; 3,981; 7,741; 14,403 GHz. Frekvence jsou zaznamenány v grafu vstupního činitele odrazu (obr. 3.9). Splnění cíle širokopásmovosti je možné dosáhnout další analýzou a optimalizací modelu.



Obrázek 3.9: Vstupní činitel odrazu pro 4. iteraci Sierpinského trojúhelníkové antény před optimalizací

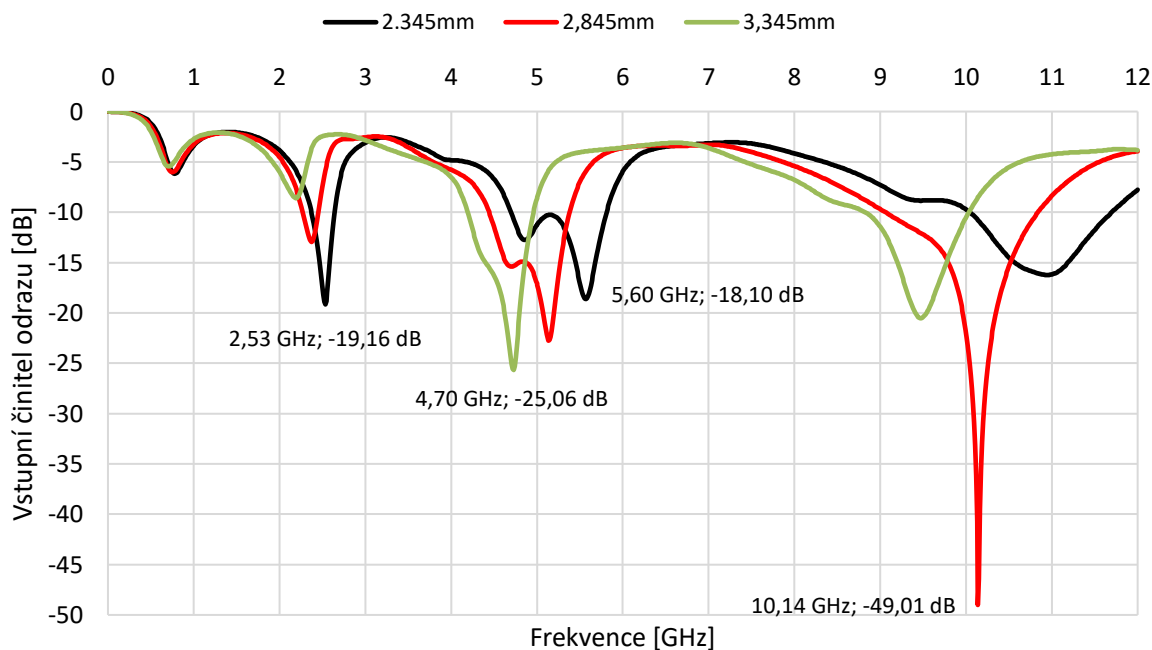
Před započítáním dalších analýz byla provedena změna parametrů konstrukce antény, tak aby rezonanční frekvence byla co nejblíže hodnot 2,4 GHz a 5 GHz. Využil jsem pro přepočet hodnot rozměrů trojúhelníku vztah 2.3, který slouží k odhadu rezonančních frekvencí. Přepočtené hodnoty jsou: výška největšího trojúhelníku 65 mm a délka strany největšího trojúhelníku 75 mm. Pro nejmenší trojúhelníky jsou hodnoty výšky 4,063 mm a pro délku strany 4,690 mm. Hodnoty jsou v simulacích označovány písmeny  $v$  a  $w$ , kde hodnota délky strany je uváděna, jako poloviční. Velikost reflektoru jsem zvolil 104x104 mm. Za pomoci tohoto přepočtu jsem docílil posunu rezonanční frekvencí na bezlicenční pásmo. Dále jsem provedl analýzu vlivů změn rozměrů.

Vybranými parametry analýzy je rozměr trojúhelníků tvořících 4. iterace a velikost reflektoru. U rozměru trojúhelníků je pozornost kladena na výšku  $h$  a délku strany  $a$ . Na obrázku 3.10 je znázorněn vliv výšky  $h$  na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu s krokem parametrické analýzy 1 mm. Náznorně můžeme vidět, jak dochází se zvyšující se hodnotou výšky k posunu rezonancí na nižší frekvence.



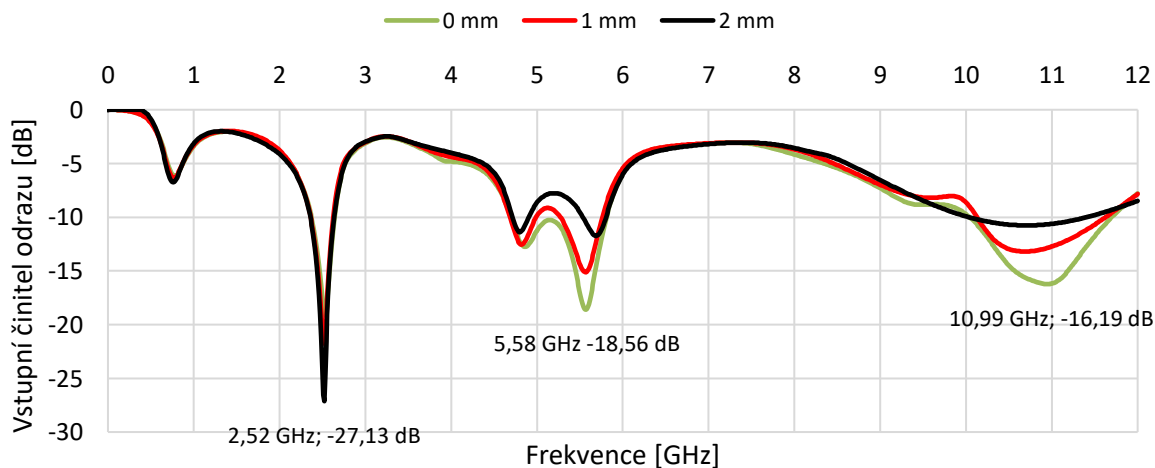
Obrázek 3.10: Vliv změny výšky  $h$  na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu pro 4. iteraci

Následující analýzou bylo sledování vlivu změny délky strany trojúhelníků vůči vstupnímu činiteli odrazu. Obrázek 3.11 znázorňuje provedenou analýzu, ve které dochází se zvyšující se hodnotou délky strany k posunu rezonančních frekvencí ve směru k nižším frekvencím. Krok parametrické analýzy je zde 0,5 mm.



Obrázek 3.11: Vliv změny délky strany  $a$  na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu pro 4. iteraci

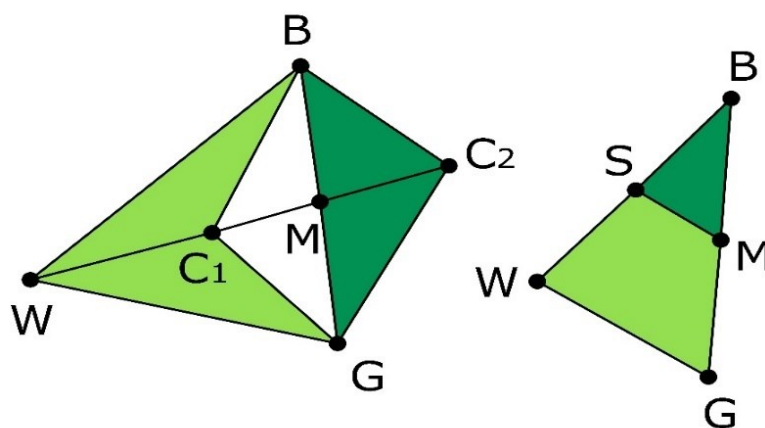
Poslední analýzou byl vliv odsazení zářiče od reflektoru na vstupní činitel odrazu antény. Výsledek je zobrazen na obrázku 3.12, kde je vidět, že odsazení k vyšším hodnotám má negativní vliv na zkoumaný parametr. Krok parametrické analýzy byl zvolen 1 mm. Byl zkoumán i vliv velikosti reflektoru, ten však neměl téměř žádný vliv na výsledky, tudíž zde grafické znázornění není uváděno.



Obrázek 3.12: Vliv polohy zářiče vůči reflektoru na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu pro 4. iteraci



Z provedené analýzy je zřejmé, že jednotlivé výše analyzované vlastnosti spolu při kmitočtovém ladění úzce souvisí. Avšak k dosažení co možná nejlepší optimalizace bylo nutné využít simplexní optimalizační algoritmus Nelder Mead Simplex, který je přímo obsažen v simulačním programu. Algoritmus patří mezi negradientní optimalizační metody a využívá modifikací metodou přímého hledání. Zvolená oblast, ve které je hledáno optimum, je pokryta sítí tvořenou body. Metoda Nelder Mead Simplex Algorithm slouží pro nalezení lokálního minima dané funkce několika proměnných. Ve 3D prostoru je algoritmus založen na principu pravidelného čtyřstěnu. Nejhorší vrchol, kde je  $f(x, y)$  největší, je odmítnut a nahrazen novým vrcholem. Po vytvoření nového trojúhelníku hledání pokračuje. Tento proces vytváří trojúhelníky, které mohou mít různé tvary. Postupným zmenšováním trojúhelníků se vzdálenosti mezi jejich vrcholy minimalizují. Tím dochází k optimalizaci daného řešení. Jeho průběh je účinný a výpočetně kompaktní [14], [15], [16]. Obrázek 3.13 znázorňuje obrazce a body algoritmu.



Obrázek 3.13: Obrazce a body metody Nelder Mead Simplex

Optimalizace byla provedena ve dvou opakováních, přičemž byl následně vybrán lepší z výsledků. Nastavení zkoumaných parametrů, operátorů a rozsahu je znázorněno v tabulce 3.2. Celkový počet provedených simulačních výpočtů je 91. Samotné grafy pro vývoj optimalizovaných parametrů v závislosti na optimalizačním kroku a průběh kritériální funkce optimalizace jsou součástí přílohy (příloha A, obr. A.3 a obr. A.4).

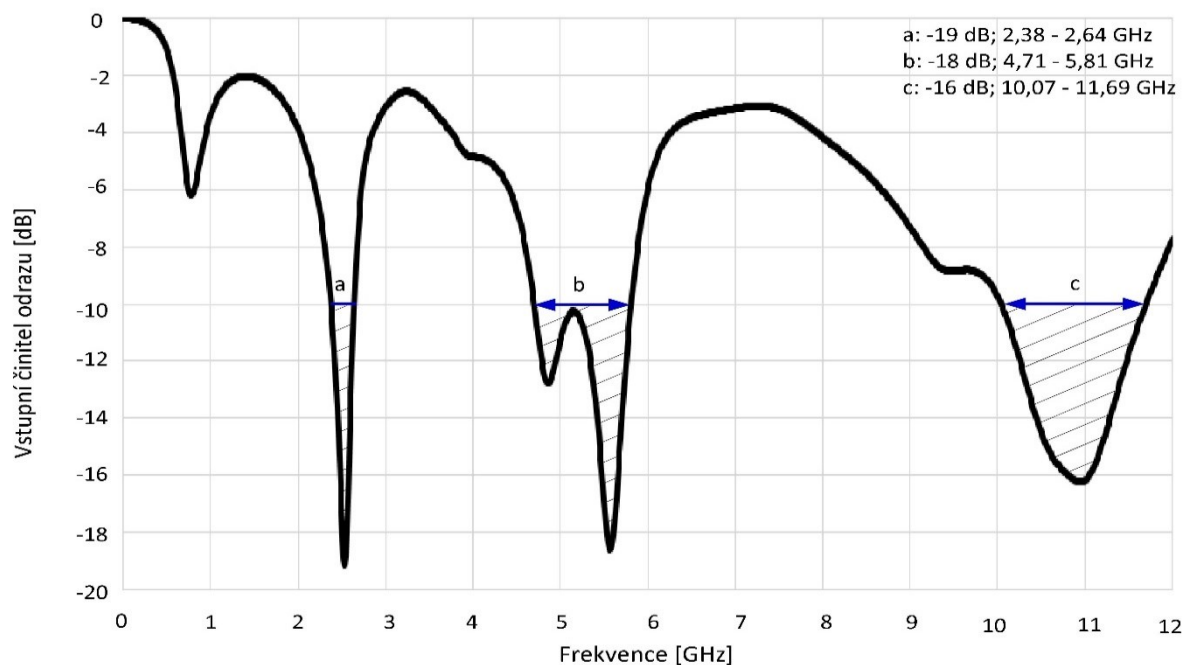
Tabulka 3.2: Nastavení mezi optimalizace metodou Nelder Mead Simplex pro Sierpinského trojúhelník

Rozsah hodnot [mm]	Parametr	Operátor [dB]	Rozsah [GHz]
$h$	S11	< -30	2,3 – 2,5
$a$		< -30	4,9 – 5,1

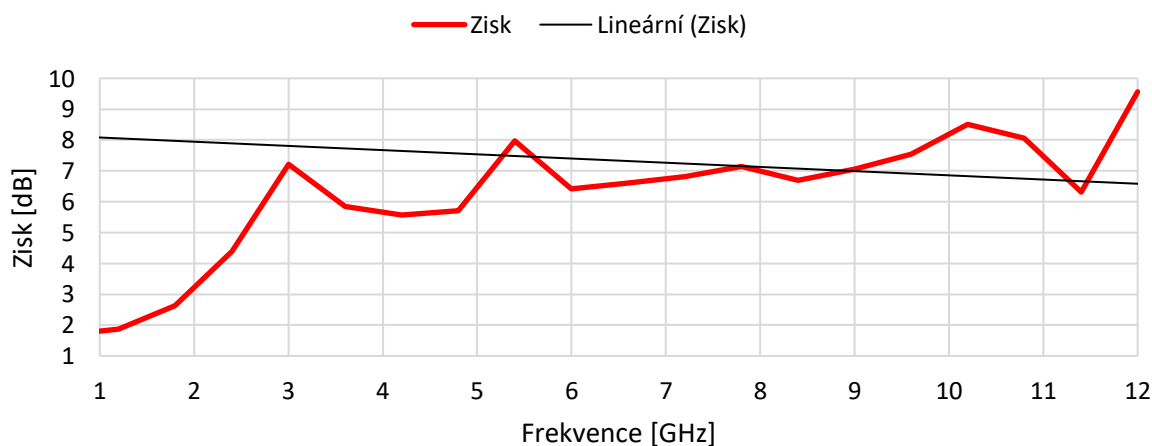
Výsledkem optimalizační metody je optimalizace na hodnoty bezlicenčního pásma vzhledem k vstupnímu činiteli odrazu a co možná největší širokopásmovost antény. Rezonanční frekvence (obr. 3.14), hodnota PSV a zisk (obr. 3.15) jsou uvedeny v tabulce 3.3. Rozpětí rezonančních frekvencí v tabulce, jsou udávány pro hodnoty vstupního činitele odrazu menší než -10 dB. V příloze A u obrázku A.3 můžeme mimo jiné vidět i zda se při rezonančních frekvencích jedná o kapacitanci či reaktanci. Dále zde pro názornost uvádím směrové charakteristiky v polárním (obr. 3.16, 3.17) a 3D zobrazení (obr. 3.18, 3.19) pro hodnoty frekvencí 2,4 GHz a 5 GHz. Takto optimalizovanou anténu je již možné využít pro konstrukci a následné ověření správnosti konstrukce měřením.

Tabulka 3.3: Hodnoty optimalizované simulace Sierpinského trojúhelníkové antény

Rozpětí rezonančních frekvencí pod -10 dB [GHz]	Nejnižší hodnota činitele odrazu [dB]	Nejnižší hodnota poměru stojatých vln [-]	Zisk [dBi]
2,38 – 2,64	-19,06	1,25	4,68
4,71 – 5,81	-18,04	1,29	7,72
10,07 – 11,69	-16,11	1,37	8,49

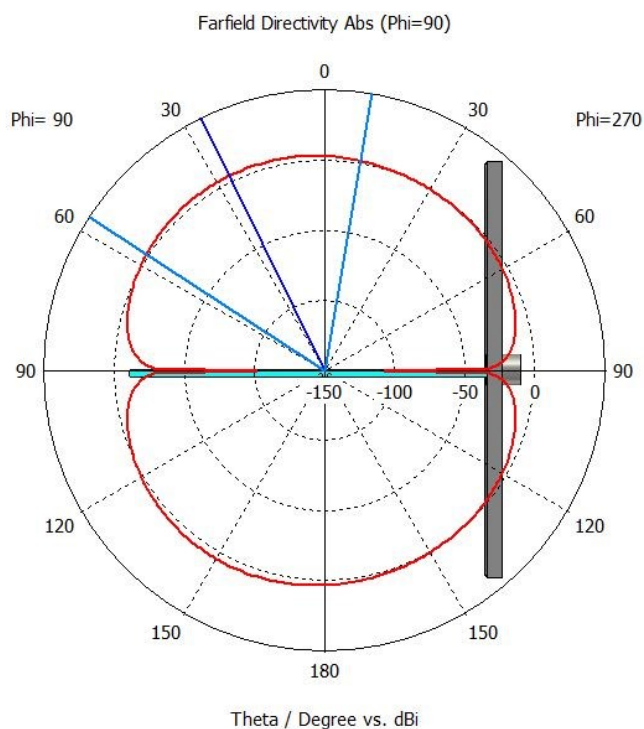


Obrázek 3.14: Vstupní činitel odrazu pro optimalizovanou 4. iteraci

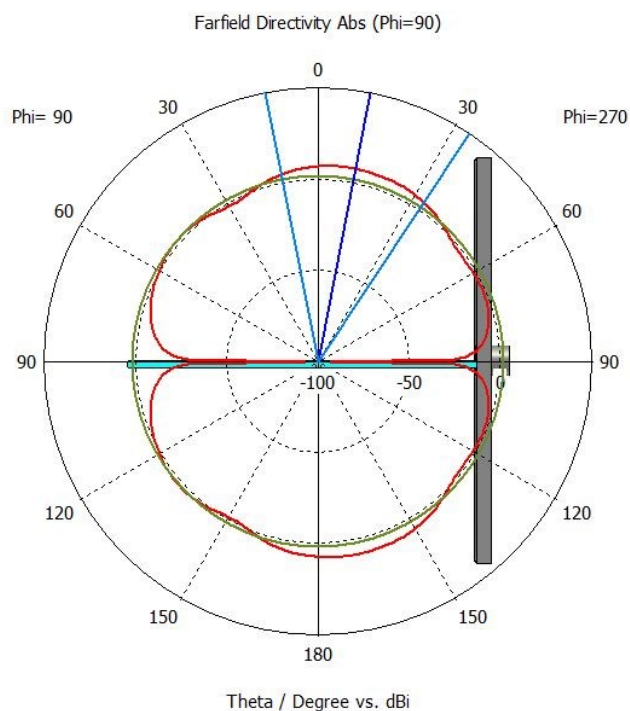


Obrázek 3.15: Zisk 4. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény v závislosti na frekvenci

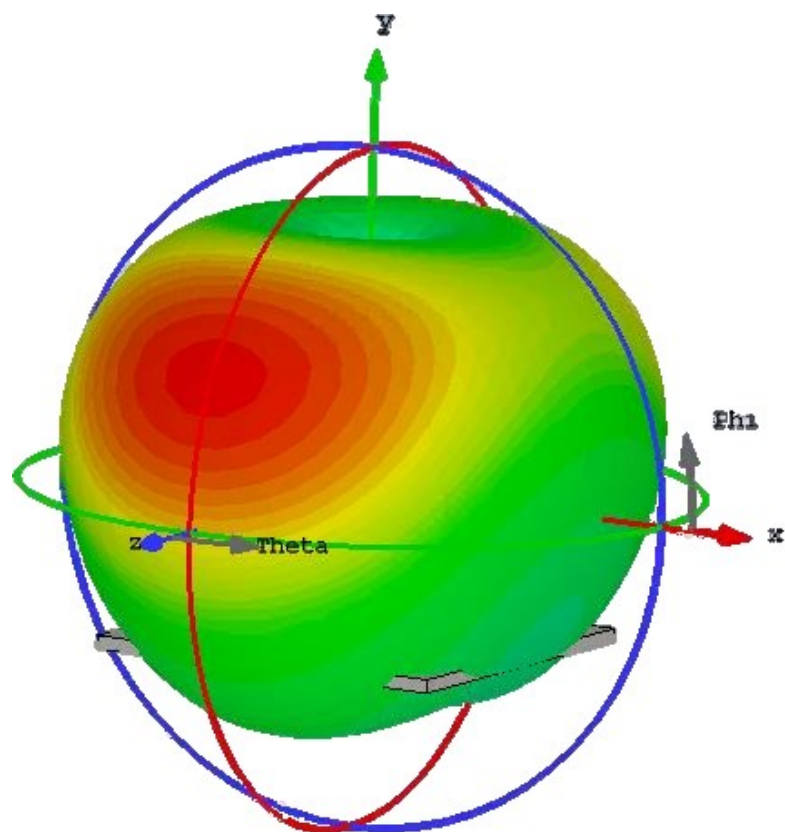
Směrové vlastnosti byly vytvořeny pro dva rezonanční kmitočty 2,4 GHz a 5 GHz. Tvary charakteristik naznačují míru záření Sierpinského trojúhelníkové antény do prostoru. Zisk antény se pohybuje v rozmezí 4–9 dBi. U polárních grafu se jedná o řez vertikální rovinou  $\Phi = 90^\circ$ . U vyzařovacích charakteristik je patrné poměrně symetrické vyzařování. Směrovost antény je větší ve směru horizontálním, což je hlavní směr vyzařování.



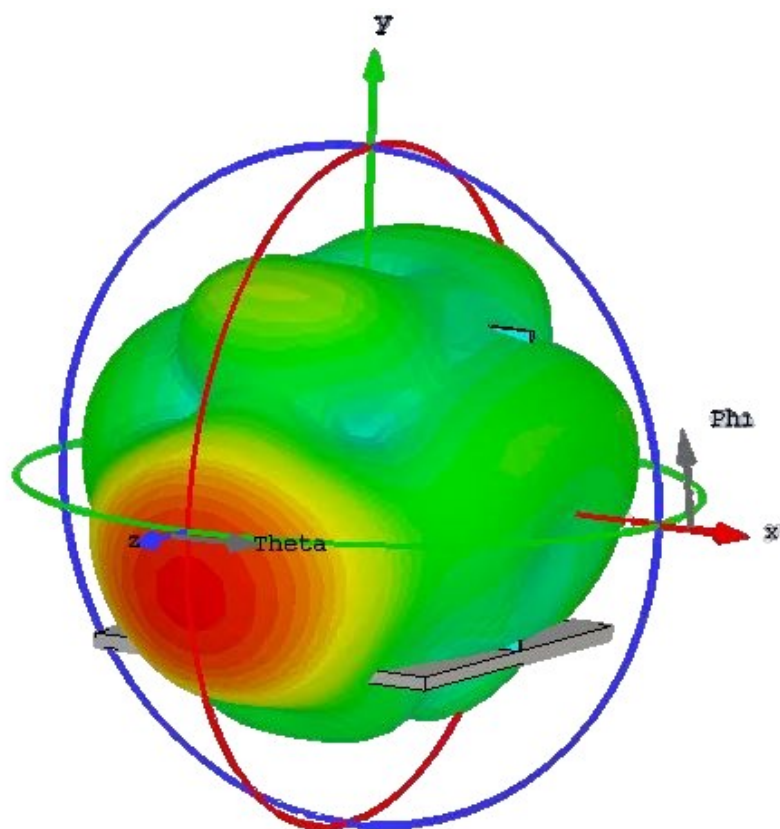
Obrázek 3.16: *Směrová charakteristika Sierpinského trojúhelníkové antény pro 2,4 GHz*



Obrázek 3.17: *Směrová charakteristika Sierpinského trojúhelníkové antény pro 5 GHz*



Obrázek 3.18: 3D zobrazení směrové charakteristika Sierpinského trojúhelníkové antény pro 2,4GHz

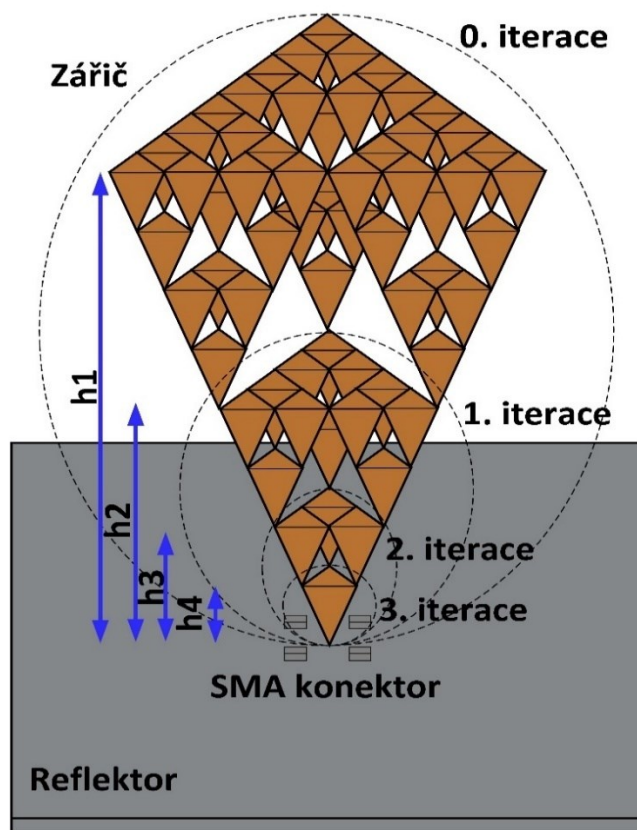


Obrázek 3.19: 3D zobrazení směrové charakteristika Sierpinského trojúhelníkové antény pro 5 GHz

Optimalizací bylo dosaženo širokopásmovosti Sierpinského trojúhelníkové antény, avšak širokopásmovost není v takové míře, aby se dalo konstatovat, že bylo dosaženo maximálních hodnot pracovní šířky pásma antény. Vzhledem k tomuto výsledku jsem provedl další analýzu několika možných variací Sierpinského fraktálu. Nejprve jsem provedl simulaci oboustranného fraktálu. Bohužel však parametry nesplňovaly očekávané výsledky a nepřinesly žádné zlepšení. Tížených hodnot bylo dosaženo při experimentování s 3D modelem Sierpinského fraktálu, neboli Sierpinského pyramidou. Trojrozměrný model Sierpinského fraktálu je zmíněn v kapitole 2.4.2, kde jsou popsány specifika a tvorba tohoto typu fraktálu. Model není příliš často konstruován v anténní technice především pro svou složitou konstrukci, avšak jeho struktura přináší určitá zlepšení vzhledem k širokopásmovosti. Následující kapitola se věnuje právě 3D modelu Sierpinského pyramidy, kdy je provedena analýza, návrh a optimalizace modelu.

### 3.3.3 Sierpinského pyramidová anténa

Sierpinského pyramida je velmi specifický druh antény s 3D zářičem, který je založen na motivu Sierpinského trojúhelníku a je umístěn kolmo k reflektoru. Nejspolehlivější realizací modelu je 3D tisk nebo tvarování vodivých plátů, v případě dostatečně velké konstrukce zářiče. Postupně byly provedeny simulace iterací Sierpinského pyramidy a zkoumání jejich vlastností a chování. Výsledkem zkoumání byl výběr vhodné iterace pro další experimentování. Následně byla provedena analýza vlivu na změny velikosti parametrů antény a optimalizace za pomoci optimalizačních algoritmů vzhledem k dosažení cílů práce. Obrázek 3.20 zobrazuje tři iterace a konstrukci Sierpinského pyramidové antény.



Obrázek 3.20: Zobrazení iterací Sierpinského pyramidové antény realizované 3D tiskem

Již z hlediska praktické realizace konstrukce a velikosti antény je nejvhodnější možnou konstrukcí 3. iterace. I přesto jsem provedl postupné simulování a zkoumání čtyř iterací antény (obr. 3.21 – 3.25). Jelikož je 3D model variantou Sierpinského trojúhelníku využil jsem pro analýzu vlivu iterací totožné prvotní doporučené rozměry antény a to výšku  $h = 88,9 \text{ mm}$  a délku strany  $a = 102,653 \text{ mm}$ . Celkový frekvenční rozsah simulování byl zvolen 0–15 GHz. Konektor, materiály reflektoru a zářiče byly totožné, jako u Sierpinského trojúhelníku. Konstrukce modelů pro simulaci je provedena metodou kopírování. Sierpinského pyramida je sestavena ze série malých jehlanů. Nejdříve byly sestaveny pyramidy 0., 1., 2., 3. a 4. iterace, kde byl zkoumán vliv iterování jehlanů.

První sestrojenou iterací je 0. iterace (obr. 3.21). Anténa se skládá pouze z jednoho velkého jehlanu. Celkové vykazované parametry nejsou kvalitní. Hlavní rezonanci je frekvence 0,55 GHz. Opět jako u 0. iterace Sierpinského trojúhelníkové antény je tato iterace málo v praxi využívána. Ať už pro svou konstrukci, tak pro nutnost využití přizpůsobovacího členu. Anténa je poměrně úzkopásmová.

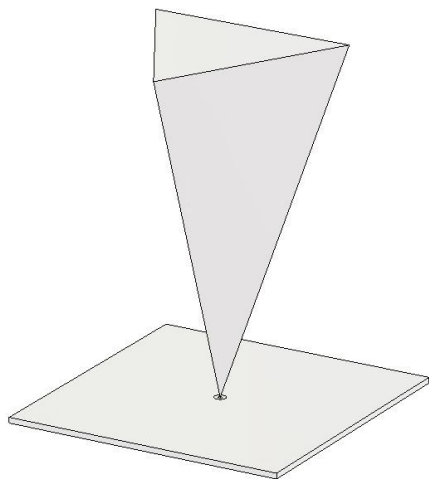
Další vzniklou iterací je 1. iterace (obr. 3.22). Iterace se skládá ze čtyř jehlanů. Hlavní rezonanční frekvencí, která u antény vzniká, je frekvence 2,01 GHz. Nyní anténa vykazuje dvě rezonanční frekvence (2,01 a 0,55 GHz), je zde názorně vidět, jak iterace ovlivňují vznik rezonancí.

Následující 2. iterace (obr. 3.23) je konstruována přidáním dalších jehlanů. Vzniká rezonance na frekvenci 4,83 GHz a rezonanční frekvence původního iterování jsou zachovány.

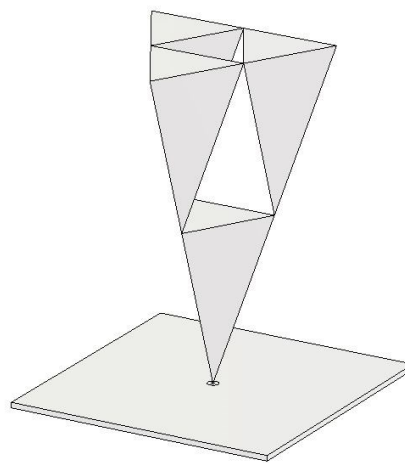
U 3. iterace (obr. 3.24) jsou čtyři rezonanční frekvence: 0,55; 2,01; 4,14 a 8,63 GHz. Model vykazuje nejlepší parametry při poměru složitosti konstrukce ku výslednému počtu rezonancí.

Posledním testovaným modelem je 4. iterace (obr. 3.25). Rezonanční frekvence jsou velmi podobné frekvencím předchozího modelu. Nové rezonanční frekvence vznikají na vysokých frekvencích, které nejsou příliš atraktivní. Další iterace již nejsou testovány, jelikož samotná složitost konstrukce by bránila praktické výrobě antény. Výsledné grafy vstupního činitele odrazu všech čtyř iterací jsou součástí přílohy (příloha A, obr. A.5).

Z postupného zkoumání vlivu iterací na změnu vstupního činitele odrazu je patrný vliv počtu opakování soběpodobné struktury. Každou další iterací vznikají nové rezonanční frekvence, čímž se potvrdily teoretické předpoklady zkoumání.

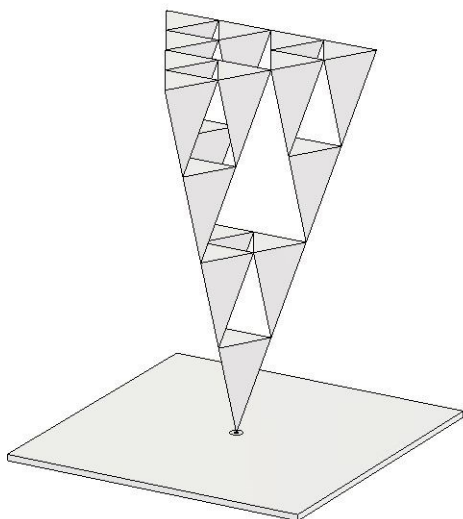


Obrázek 3.21: 0. iterace Sierpinského pyramidy

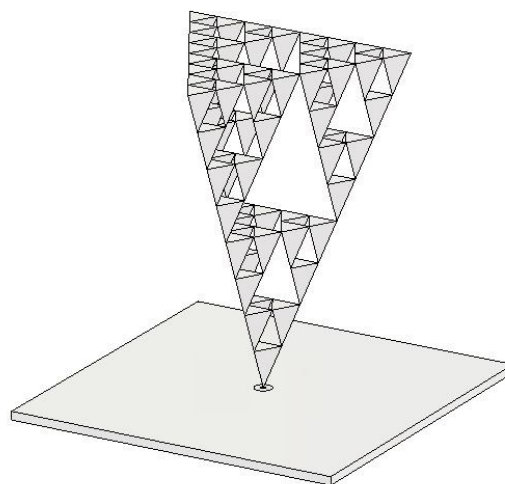


Obrázek 3.22: 1. iterace Sierpinského pyramidy

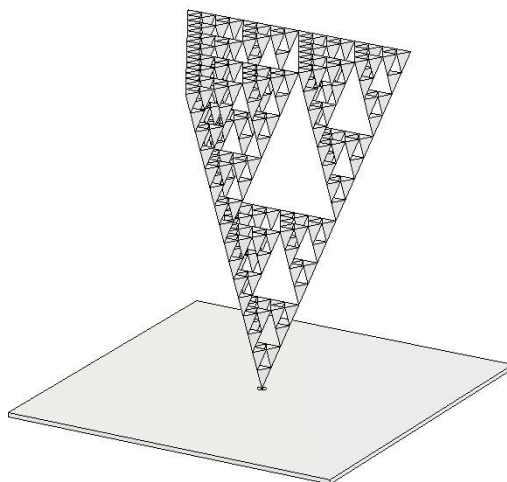




Obrázek 3.23: 2. iterace Sierpinského pyramidy

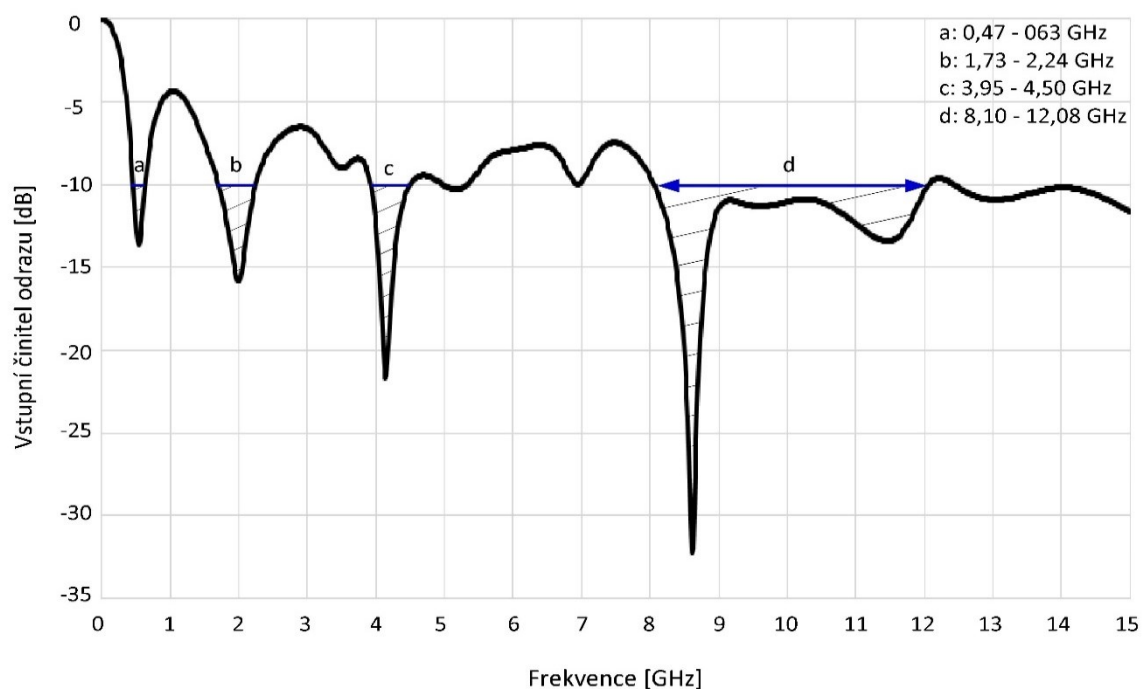


Obrázek 3.24: 3. iterace Sierpinského pyramidy



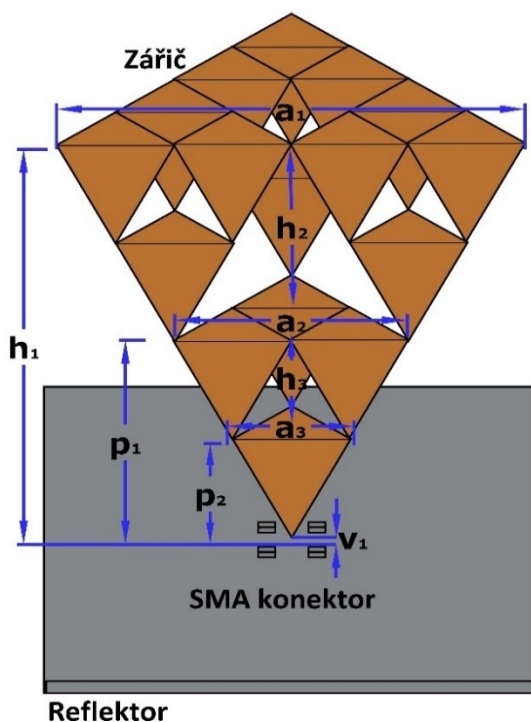
Obrázek 3.25: 4. iterace Sierpinského pyramidy

Jako nejvhodnější konstrukce byla zvolena 3. iterace (obr. 3.24). Důvodem volby je: počet rezonančních frekvencí, vhodnost pro optimalizaci, přívětivá velikost zářiče a samotná realizovatelnost složitosti konstrukce. Na obrázku 3.26 můžeme vidět vstupní činitel odrazu simulované antény pro zmiňovanou 3. iteraci.



Obrázek 3.26: Vstupní činitel odrazu pro 3. iteraci Sierpinského pyramidu před optimalizací

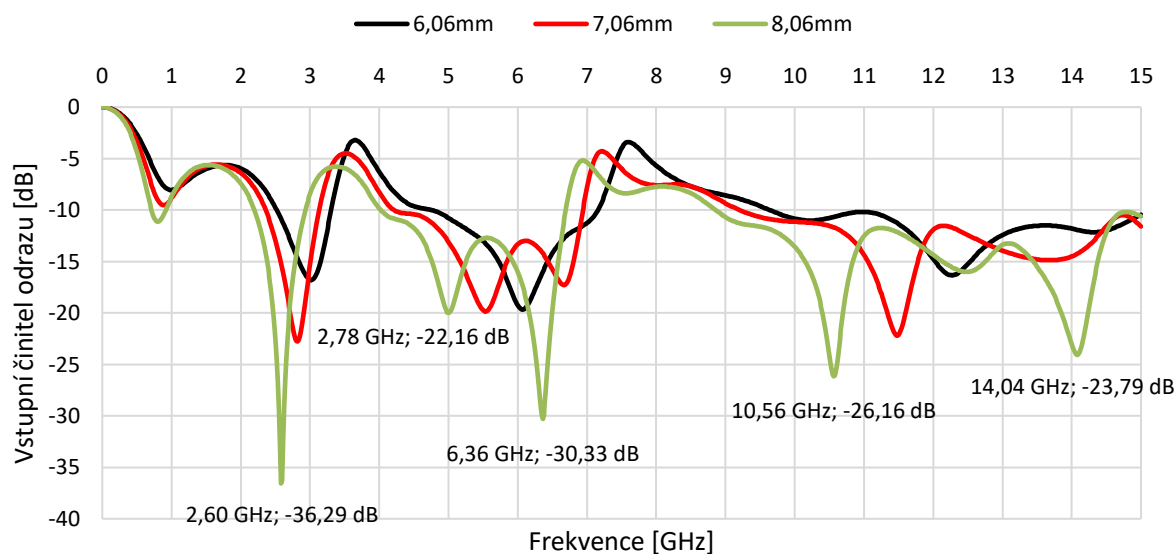
Následovala analýza chování parametru výšky  $h$ , délky strany  $a$  a vlivu odsazení  $v$  zářiče od reflektoru. Analýza poskytuje další důležité fakta pro optimalizaci a chování antény. Na obrázku 3.27 jsou znázorněny analyzované parametry.



Obrázek 3.27: Analyzované parametry Sierpinského pyramidu

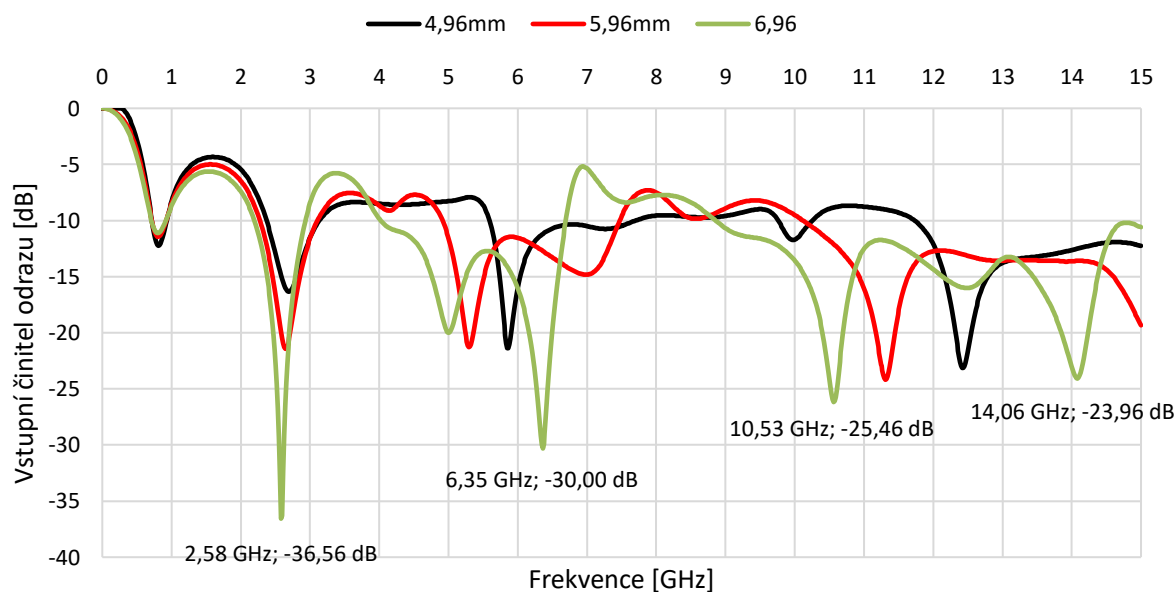


Na obrázku 3.28 je znázorněn vliv výšky  $h$  jehlanu na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu s krokem parametrické analýzy 1 mm. Názorně můžeme vidět, jak dochází se zvyšující se hodnotou výšky k posunu rezonancí na nižší frekvence.



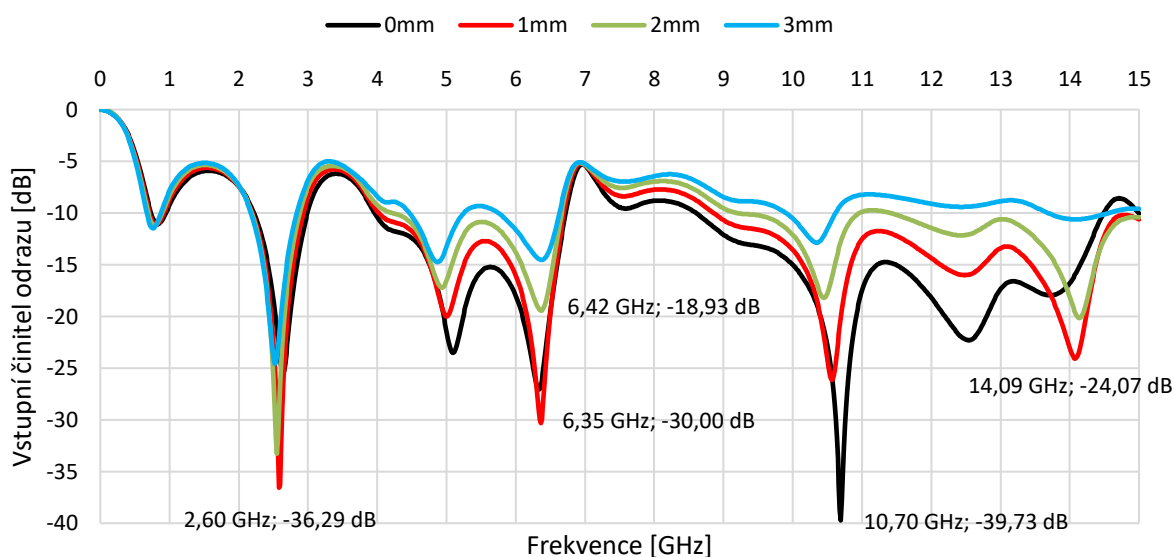
Obrázek 3.28: Vliv změny výšky na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu pro 3. iteraci Sierpinského pyramidy

Další analýzou bylo sledování vlivu změny délky strany  $a$  jehlanu vůči vstupnímu činiteli odrazu. Obrázek 3.29 znázorňuje tuto analýzu a můžeme vidět, jak dochází se zvyšující se hodnotou délky strany k posunu rezonančních frekvencí ve směru k nižším frekvencím. Krok parametrické analýzy je zde 1 mm.



Obrázek 3.29: Vliv změny délky strany na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu pro 3. iteraci Sierpinského pyramidy

Poslední analýzou u Sierpinského pyramid je zkoumání vlivu výšky  $v$  zářiče od reflektoru. U této analýzy, jako u jediné, nedochází k posunu rezonančních frekvencí. Na obrázku 3.30 můžeme vidět prohlubování aktuálních rezonančních frekvencí. Nejlepší parametry byly zaznamenány při výšce 1 mm. U analýzy byl využit krok měření 1 mm.



Obrázek 3.30: Vliv změny polohy zářiče vůči reflektoru na kmitočtovou závislost vstupního činitele odrazu pro 3. iteraci Sierpinského pyramidu

Ze všech provedených analýz je zřejmé, že jednotlivé výše analyzované vlastnosti spolu při kmitočtovém ladění úzce souvisí. Největší vliv na širokopásmovost antény prokázalo experimentální měření vlivu výšky zářiče od reflektoru. Analýzy poskytly potřebné znalosti o chování antény.

I u Sierpinského pyramidy jsem provedl optimalizaci za pomoci optimalizačních algoritmů. Opět byl využit algoritmus Nelder Mead Simplex, který je obsažen v simulačním programu. Popis funkce algoritmu je obsažen v kapitole 3.3.2.

Optimalizace byla provedena ve dvou opakováních, přičemž byl následně vybrán lepší z výsledků. Nastavení zkoumaných parametrů, operátorů a rozsahu je znázorněno v tabulce 3.4. Rozsah hodnot rozměrů pro optimalizaci se skládá z výšky  $h$ , délky strany  $a$  a z hodnoty zkosení  $zk$ . Celkový počet provedených simulačních výpočtů je 148. Zkosení vyjadřuje míru seřezání vrcholů jehlanu, pro následnou snazší praktickou výrobu. Samotné grafy pro vývoj optimalizovaných parametrů v závislosti na optimalizačním kroku a průběh kritériální funkce optimalizace jsou součástí přílohy (příloha A, obr. A.7 a obr. A.8).

Tabulka 3.4: Nastavení mezi optimalizace metodou Nelder Mead Simplex pro Sierpinského pyramidu

Rozsah hodnot [mm]	Parametr	Operátor [dB]	Rozsah [GHz]
$h$	3,0 – 5,0	S11	< -30
$a$	1,8 – 3,2		
$zk$	0,8 – 1,2		4,9 – 5,1

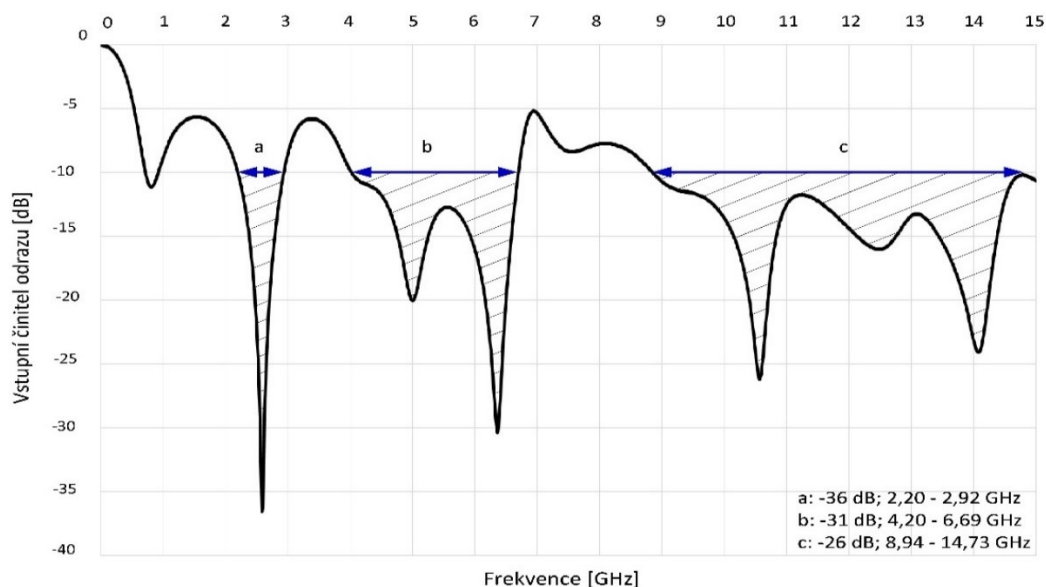
Využitím optimalizační metody bylo dosaženo optimalizace na hodnoty bezlicenčního pásma vzhledem k vstupnímu činiteli odrazu a co možná největší širokopásmovost antény. V tabulce 3.5 jsou

znázorněny: rozsah rezonančních frekvencí (obr. 3.31), hodnota PSV a zisk (obr. 3.32). Rozpětí rezonančních frekvencí je udáván pro hodnoty vstupního činitele odrazu menší než  $-10$  dB. V příloze A můžeme mimo jiné u obrázku A.8 sledovat, zda se při rezonančních frekvencích jedná o kapacitanci či reaktanci. Dále zde pro názornost uvádím směrové charakteristiky v polárním (obr. 3.33, 3.34) a 3D zobrazení (obr. 3.35, 3.36) pro rezonanční frekvenci 2,4 GHz a 5 GHz. Celková struktura a model zářiče antény je díky postupným experimentálním pokusům s rozměry a následnou optimalizací unikátním modelem antény. Takto optimalizovanou anténu již je možné využít pro konstrukci a následné ověření správnosti konstrukce měřením.

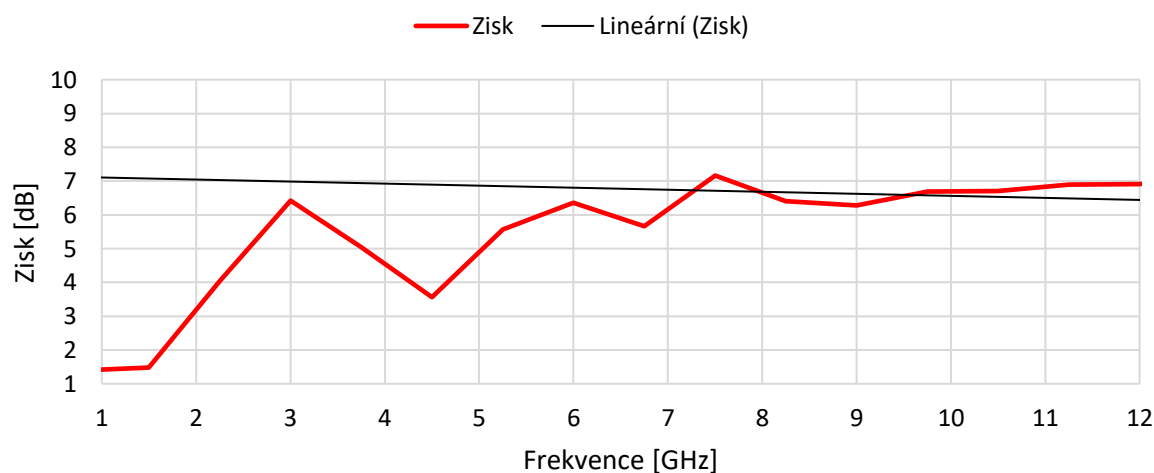
Tabulka 3.5: Hodnoty optimalizované simulace 3. iterace Sierpinského pyramidy

Rozpětí rezonančních frekvencí pod $-10$ dB [GHz]	Nejnižší hodnota činitele odrazu [dB]	Nejnižší hodnota poměru stojatých vln [-]	Zisk [dBi]
0,71 – 0,92	-11,146	1,767	1,407
2,20 – 2,92	-40,122	1,019	6,416
4,20 – 6,69	-29,072	1,075	6,364
8,94 – 14,73	-25,026	1,119	7,339

Optimalizované rozměry antény jsou: délky strany  $a$  nejmenšího jehlanu 6,963 mm, výška  $h$  nejmenšího jehlanu je 8,068 mm a rozměr reflektoru je 80x80 mm. Jelikož anténa bude vyráběna 3D tiskem, musí se provést, již zmíněná úprava konstrukce zkosením. 3D tiskárna by nedokázala vyrobit model antény s ostrými vrcholy jehlanů. Bohužel však i přes zkosení vrcholů jehlanu se nepodařilo tento typ zářiče za pomoci univerzitou dostupných technik 3D tisku vyrobit. Bylo vyzkoušeno několik variant tisku, ať už s podpěrami či rozčtvrcení modelu zářiče. Nakonec musel být finální model pro tisk upraven, tak aby jej bylo možné zkonstruovat. Výsledné grafy a rozměry, které jsou zde uváděny jsou pro konstrukci nerealizovatelného zářiče, jelikož je cílem navrhnout co nejvíce širokopásmovou anténu, což návrh splňuje. Pokud by byla dostupná dokonalejší technika 3D tisku, zářič je možné vyrobit.

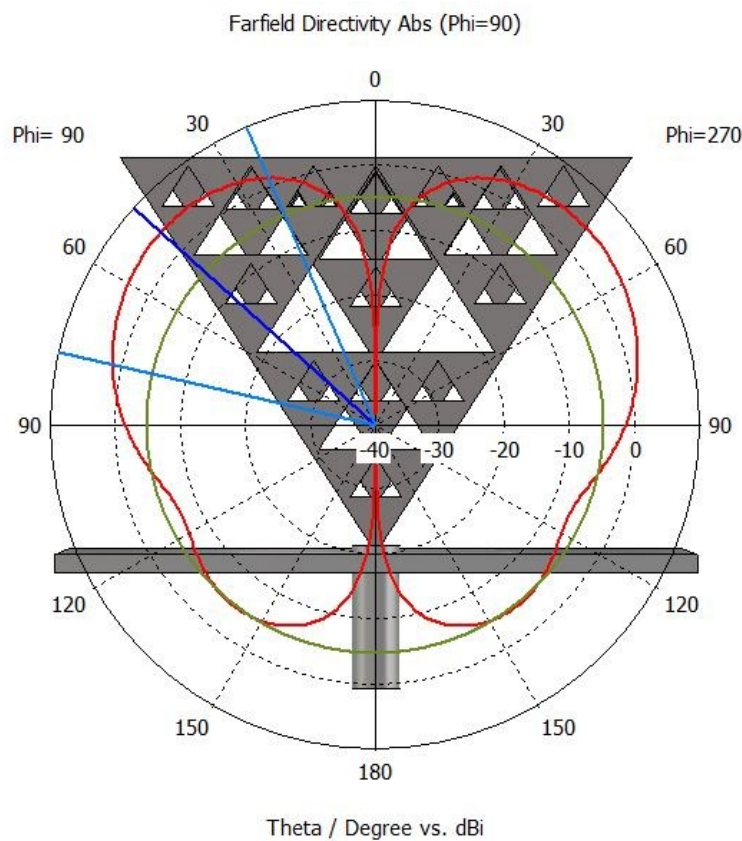


Obrázek 3.31: Vstupní činitel odrazu pro 3. iteraci Sierpinského pyramidy

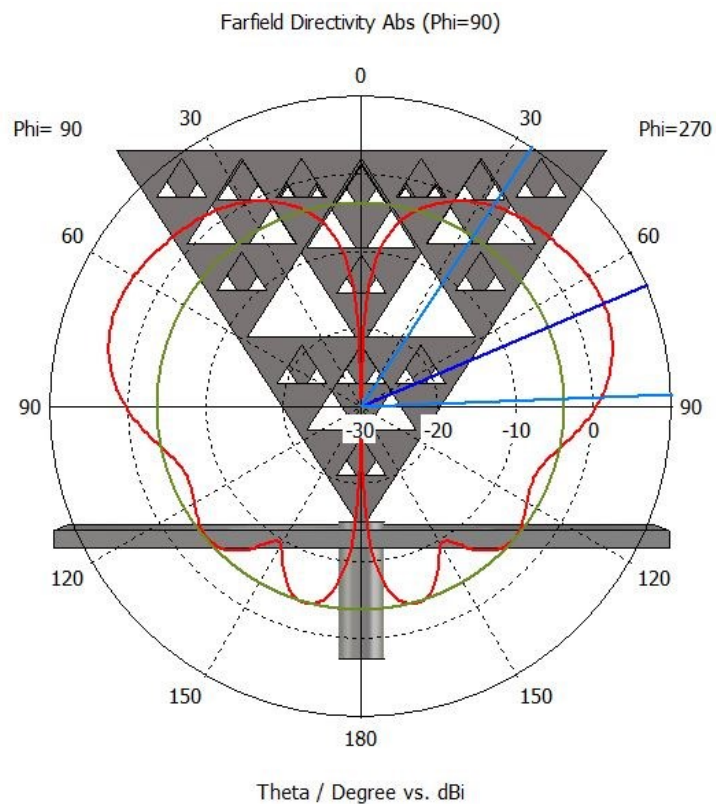


Obrázek 3.32: *Zisk pro 3. iteraci Sierpinského pyramid*

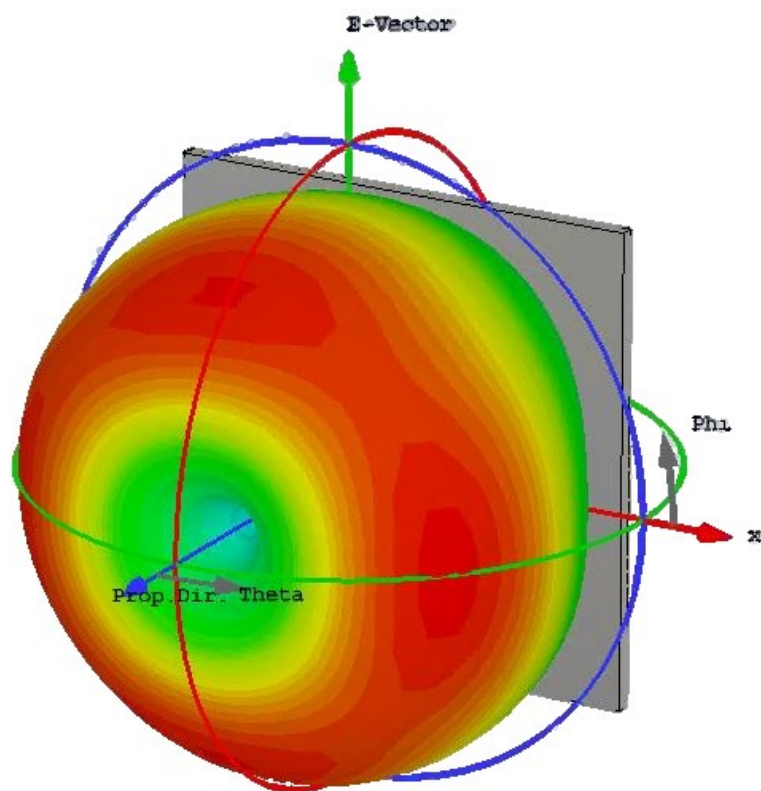
Směrové vlastnosti byly vytvořeny pro dva rezonanční kmitočty 2,4 GHz a 5 GHz. Tvary charakteristik naznačují míru záření Sierpinského pyramidové antény do prostoru. Zisk antény se pohybuje v rozmezí 2–8 dBi. U polárních grafů se jedná o řez vertikální rovinou  $\Phi = 90^\circ$ . U vyzařovacích charakteristik je patrné poměrně symetrické vyzařování. Směrovost antény je větší ve směru horizontálním, což je hlavní směr vyzařování.



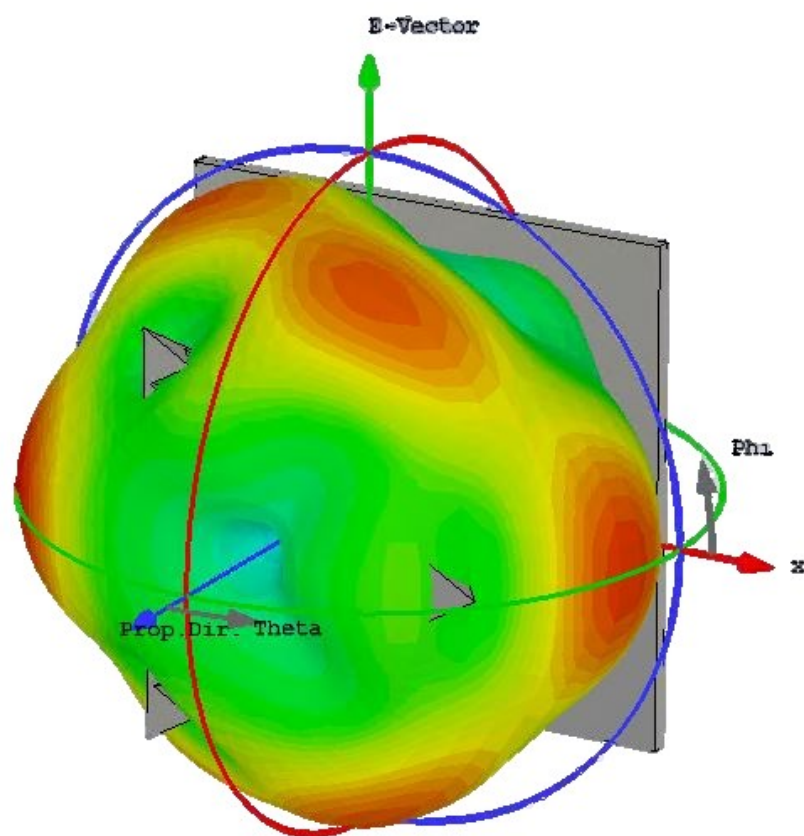
Obrázek 3.33: *Směrová charakteristika Sierpinského pyramidové antény pro 2,4 GHz*



Obrázek 3.34: Směrová charakteristika Sierpinského pyramidové antény pro 5 GHz



Obrázek 3.35: 3D zobrazení směrové charakteristika Sierpinského pyramidové antény pro 2,4GHz



Obrázek 3.36: 3D zobrazení směrové charakteristika Sierpinského pyramidové antény pro 5 GHz

## 4 Realizace praktických modelů fraktálové antény

Kapitola popisuje podrobný postup výroby antén – Sierpinského trojúhelníku 4. iterace a Sierpinského pyramidu 3. iterace.

### 4.1 Výroba Sierpinského trojúhelníkové antény

Anténa se skládá ze dvou částí – zářič a reflektor. Obě části jsou vyrobeny z FR4 desek. Na reflektor byl využit oboustranný FR4 o tloušťce 3 mm a síle mědi  $1 \times 35 \mu\text{m}$  a u zářiče byl využit FR4 o tloušťce 0,8 mm a síle mědi  $1 \times 35 \mu\text{m}$ . Další nedílnou součástí antény je konektor. Nejvhodnějším řešením je pozlacený koaxiální SMA konektor do panelu přizpůsobený na  $50\Omega$ . Materiál konektoru je pozlacená mosaz a izolace je vyrobena z teflonu.

Reflektor musel být upraven na požadované parametry, a to  $104 \times 104$  mm. Pro řezání jsem využil řezačku desek plošných spojů. Následně bylo nutné do středu desky provrtat pět otvorů na SMA konektor. Čtyři otvory jsou na upevnění šroubů a jeden otvor pro středový pin konektoru. U všech otvorů jsem provedl prokovení. Na takto upravenou desku jsem připevnil konektor za pomoci šroubů s maticemi, které jsem co možná nejvíce zapustil do FR4 desky. U středového pinu konektoru bylo nutné přivést teflonový kroužek do roviny s reflektorem. Využití oboustranné FR4 desky, prokovení děr, zapuštění šroubů a protažení teflonu do roviny s reflektorem je nutné provést rovnou z několika důvodů:

- spojení konektoru pouze čtyřmi šrouby na jednostrannou FR4 desku může zapříčinit prosakování vlny kolem konektoru,
- při nevymezení středového pinu teflonovým kroužkem dochází ke změnám impedance,
- nezapuštěním hlaviček šroubů může dojít k ovlivnění homogenity prostředí.

Všechny tyto zmíněné problémy mohou zapříčinit špatnou funkcionalitu antény.

Druhou částí byla konstrukce zářiče antény. Zářič byl zkonstruován na FR4 desku o rozměru  $104 \times 72$  mm fotocestou. Pro složitost a dosažení co největší přesnosti konstrukce, byl zářič vyroben u společnosti zabývající se prototypovou výrobou plošných spojů. Jelikož je nutné upevnit zářič kolmo k reflektoru, bylo vhodné na obě strany FR4 desky přidat dva měděné pásy o šířce 3 mm. Ty sloužily k následnému připájení zářiče k reflektoru. Pro výrobu zářiče je nutný pouze soubor s konstrukcí ve formátu .gbr (gerber data). V tomto formátu je možné data vyexportovat přímo z CST Microwave Studio. Společnost zabývající se výrobou plošných spojů využívá pouze materiál FR4 (tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí – zvláště tepelně odolný druh), který je cenově dostupný. Tento druh materiálu však není zcela vhodný v anténní technice při vyšších kmitočtech. Což může zapříčínovat degradaci výsledků vůči simulacím. Na vyšší kmitočty by bylo vhodné využít materiál nazývaný se Rogers 3003, což je keramický materiál s PTFE (Polytetrafluorethylen) vhodný až do 10 GHz. Jeho cena je však mnohonásobně vyšší. Na demonstrační účely a ověření chování antény byl zvolen materiál FR4 (obr. 4.1).

Po přípravě reflektoru a zářiče antény bylo nutné provést připájení těchto částí k sobě. Připájení jsem provedl oboustranně v několika bodech na měděné pásy. Přidání pásků se ukázalo, jako vhodné řešení pro získání potřebné stability konstrukce. Posledním bodem praktické realizace antény bylo



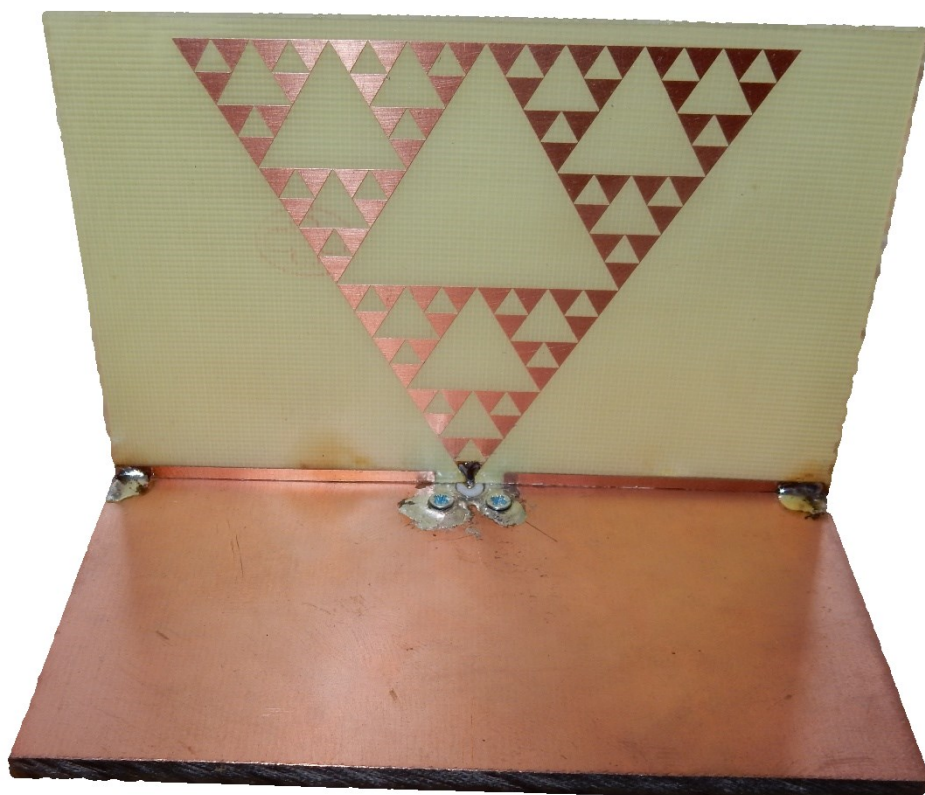
připájení konektoru k zářiči antény. Fotografie z výroby a samotný model jsou součástí přílohy práce (příloha B).

Využité součástky a materiál pro konstrukci antény:

- FR4 deska oboustranná (velikost – 104x104 mm; tloušťka – 3 mm; síla mědi 1x35  $\mu\text{m}$ ),
- FR4 deska oboustranná (velikost – 104x72 mm; tloušťka – 0,8 mm; síla mědi 1x35  $\mu\text{m}$ ),
- koaxiální konektor zlacený SMA-Z panel 50  $\Omega$ ,
- cín,
- 4x šroubek a matice,
- měděný plech.

Využité nástroje pro konstrukci antény:

- mikropájka,
- vrtačka,
- řezačka desek plošných spojů,
- šroubovák.



Obrázek 4.1: *Praktický model optimalizované Sierpinského trojúhelníkové antény 4. iterace*



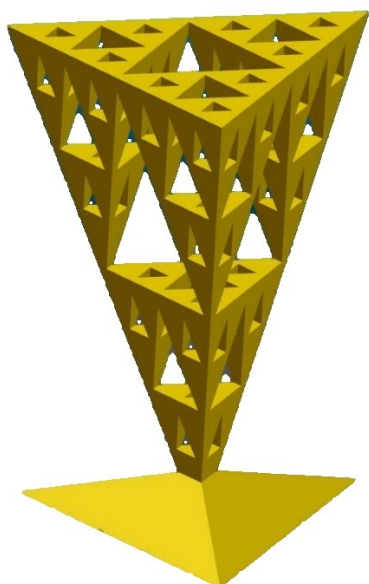
## 4.2 Výroba Sierpinského pyramidové antény

Konstrukce Sierpinského pyramidy se skládá ze zářiče a reflektoru. Přičemž reflektor je z hliníku a jeho tloušťka je 3 mm. Konstrukce antény vyžaduje specifický druh konektoru, a to SMA konektor s prodlouženým středovým pinem, který má délku 10 mm.

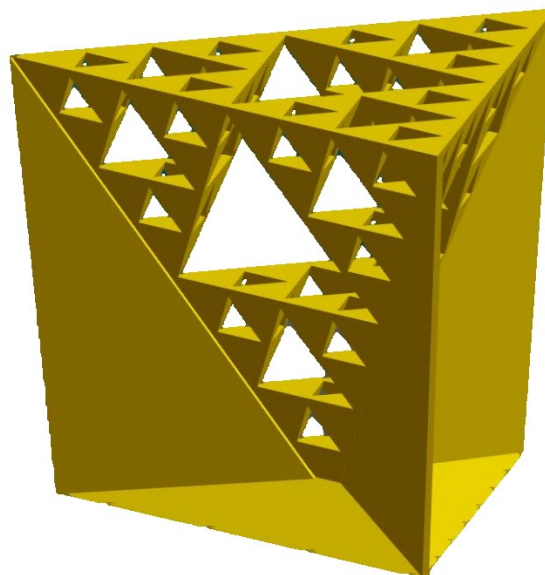
Konstrukci je vhodné započít přípravou reflektoru. Jeho rozměr je 80x80 mm. Reflektor Sierpinského pyramidové antény je vyroben z hliníku, do kterého bylo následně provrtáno pět děr na uchycení konektoru. Čtyři otvory jsou pro šrouby a jeden otvor pro středový pin konektoru. Jelikož se jedná o hliníkovou konstrukci reflektoru bylo možné provést vyřezání závitů do otvorů šroubů. Šrouby tudíž nemusí využívat matici a jsou zcela zapuštěny do reflektoru. U středového pinu konektoru bylo nutné využít vymezovací kroužek teflonu, aby nedocházelo k problémům, již zmíněným u výroby Sierpinského trojúhelníkové antény.

Dalším krokem je výroba zářiče. Jelikož je zářič trojrozměrný, nabízí se možnost provést výrobu 3D tiskem. Pro 3D tisk jsem využil tiskárnu Original Prusa I3 MK2, která byla zakoupená katedrou telekomunikační techniky. Při koupi tiskárny jsem absolvoval školení v Praze, které poskytlo potřebné znalosti při následném tisku. Samotný tvar zářiče je nutné pro svou složitost upravit tak, aby bylo možné model vytisknout. Upravený model jsem vyexportoval do formátu .stl (Stereolithography). Export je možné provést v CST Microwave Studiu. Následně jsem soubor vložil do programu jménem Slic3r, který je dodáván spolu s 3D tiskárnou. V tomto programu mohou být provedeny různá nastavení a úpravy modelu pro 3D tisk. Jako materiál tisku jsem zvolil PLA (Polylactid acid) s přesností 0,20 mm. Následně jsem provedl export souboru z formátu .stl do formátu .gcode, což je formát pro 3D tisk. Nově vzniklý soubor jsem přkopíroval na SD kartu a vložil jej do tiskárny. U tiskárny je nejprve nutné zavést filament do tiskové hlavy. Doporučeným materiálem pro tisk složitějších modelů je již zmíněný materiál PLA. Materiál vyžaduje teplotu desky tiskárny 55 °C a teplotu trysky 210 °C. Zvolil jsem tudíž, zahřívání desky a trysky pro tisk z materiálu PLA. Teploty komponent se zobrazují na displeji. Po dostatečném zahřátí jsem provedl kalibraci vzdálenosti trysky od podložky. Ta je nutná zkalibrovat pro kvalitní uchycení první vrstvy tisku na podložku, což je nejdůležitější pro celou stabilitu modelu. Existuje pro tiskárnu i kalibrace osy x, y a z. Kalibrace je prováděna pouze v těchto případech: před prvním tiskem, při podezření nesouměrnosti os nebo pokud máme problémy s tiskem modelu. Kalibrace trvá 5 minut. Po ukončení kalibrace jsem přikročil k samotnému tisku modelu. Před každým tiskem je nutné provést očištění podložky od nečistot, a to Izopropylalkoholem. Následně jsem vybral model z nabídky pro SD kartu a potvrdil tisk.

Nejdříve jsem provedl několik zkušebních tisků. Optimalizovaný model se ani po několika různých pokusech nepodařilo vytisknout (obr. 4.3). Bylo proto nutné provést úpravu modelu (obr. 4.2). Nově upravený zářič jsem nejprve vytiskl od podstavy v jednom kuse. Tiskárna úspěšně tisk zvládla, avšak plochy mezi jehlany nebyly úplně dokonale hladké a bylo nutné provést povrchové úpravy. Bohužel se nepodařilo plochy úplně zhladit a zůstal zde nerovný povrch (příloha B, obr. B.2). Jedinou možností odstranění těchto nerovných povrchů je vytisknout zářič znovu od vrcholu. Nutností je přidání podstavy, která zajistí potřebnou stabilitu modelu při tisku (obr. 4.2). Tento model se mi již podařilo vytisknout. Bylo však nutné provádět tisk velmi pomalu a neustále být tisku přítomen. Celková délka tisku jednoho modelu byla 7 hodin. Dalším krokem bylo odřezání pomocné podstavy.



Obrázek 4.2: *Upravený návrh modelu zářiče pro 3D tisk*



Obrázek 4.3: *Návrh nevytisknutelného modelu s podpěrami*

Po přípravě obou základních částí antény, jsem přikročil k samotné konstrukci. Nejprve je nutné upevnit vytisknutý zářič k reflektoru. Konstrukce upevnění je popsána na obrázku 4.4. Hlavním prvkem upevnění je měděný plech, který je upraven do tvaru vrcholu vytisknutého zářiče („kornoutu“) (příloha B, obr. B.5). Následně je vytvarovaný měděný plech připájen na středový pin konektoru tak, aby nedocházelo ke kontaktu s reflektorem. Vrchol zářiče jsem mírně seřezal, aby jej bylo možné upevnit do připájeného měděného „kornoutu“. Po přiložení zářiče do „kornoutu“ jsem provedl přilepení vteřinovým lepidlem a následně i elektrovodivým lepidlem. Finální fází výroby Sierpinského pyramidy je přestříkání zářiče měděným vodivým sprejem. Praktický model antény je zobrazen na obrázku 4.5.

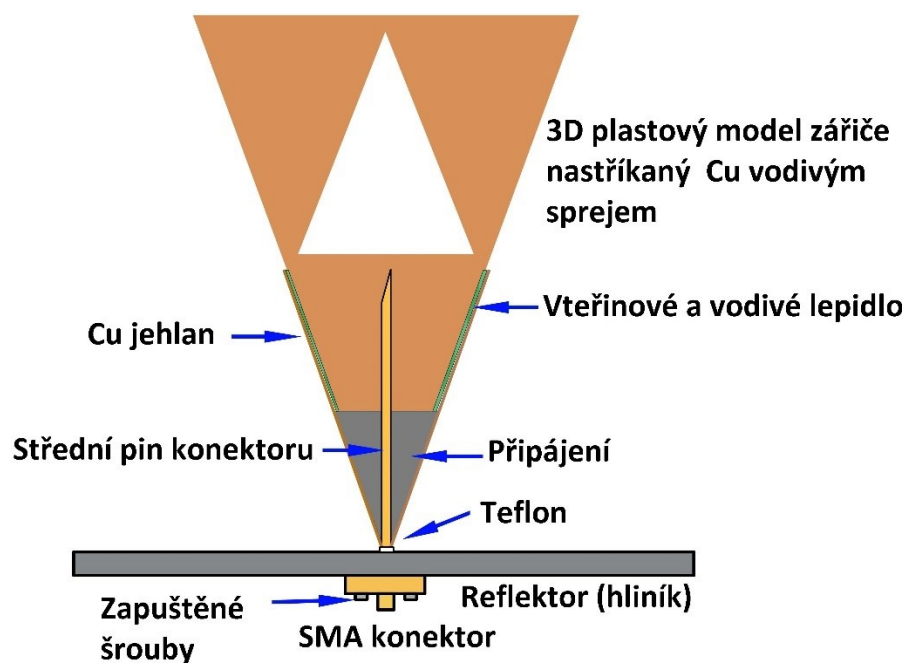
Využité součástky a materiál pro konstrukci antény:

- hliníková deska (velikost – 80x80 mm; tloušťka – 3 mm),
- PLA filament (Polyactid acid),
- koaxiální konektor SMA-Z panel 50  $\Omega$ ,
- vteřinové lepidlo,
- elektrovodivé lepidlo – ELCHEMCo wire glue,
- měděný elektrovodivý sprej EMI 35 – Kontakt Chemie; (0,3R/50 $\mu$ m),
- iso propyl alkohol na čištění,
- cín,
- měděný plech,
- 4x šroubek.

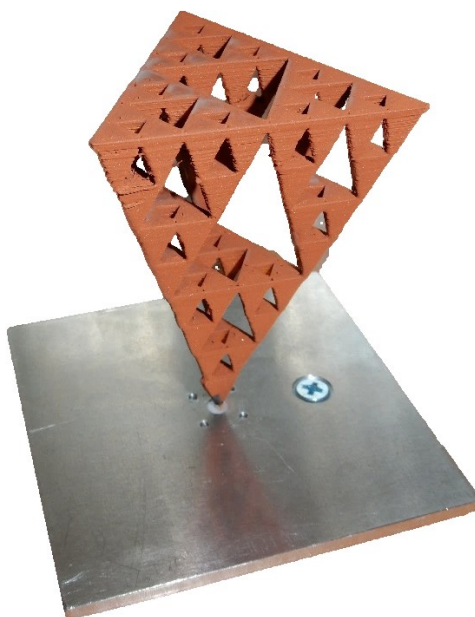
Využité nástroje pro konstrukci antény:

- 3D tiskárna - Original Prusa I3 MK2,
- mikropájka,

- špachtle,
- vrtačka,
- šroubovák.



Obrázek 4.4: Detail upevnění zářiče k reflektoru Sierpinského pyramid



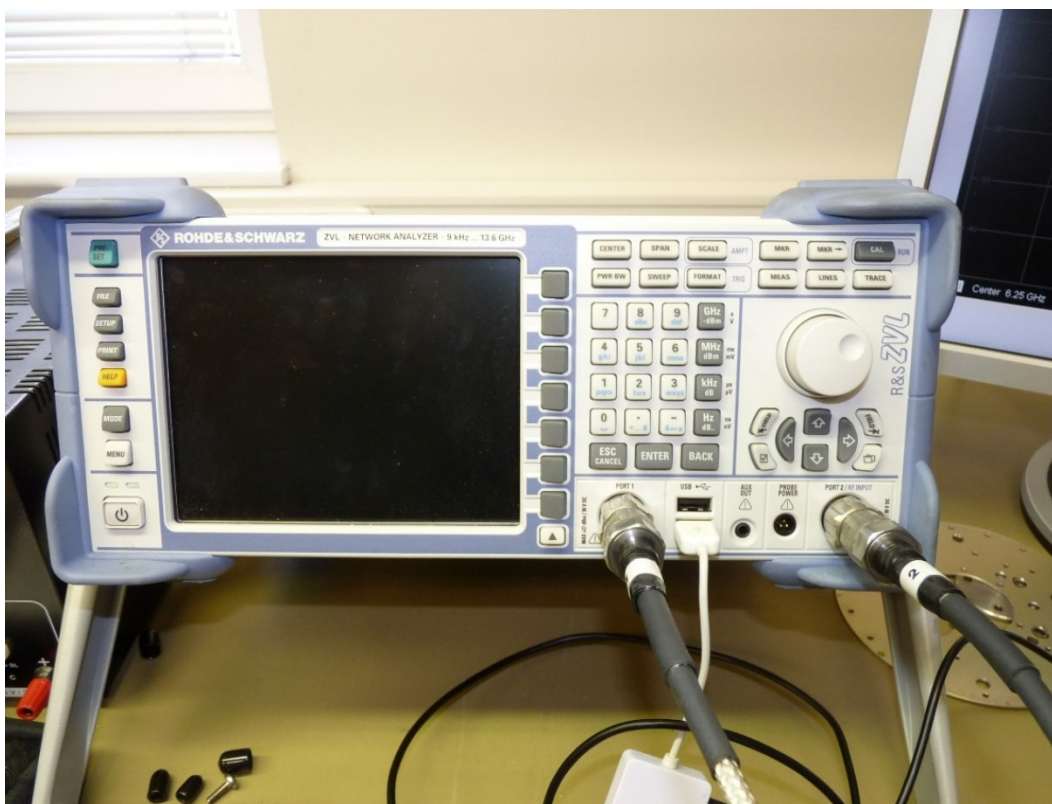
Obrázek 4.5: Praktický model optimalizované Sierpinského pyramid 3. iterace

## 5 Ověření správnosti návrhu a konstrukce měření

V předešlých kapitolách byl proveden návrh, simulace a následná praktická realizace modelů antén. Nyní bylo nutné provést ověření správnosti návrhu a konstrukce měření. Zvoleným měřicím přístrojem vzhledem k frekvenčnímu rozsahu antény je vektorový obvodový analyzátor Rohde&Schwarz ZVL13.

### 5.1 Rohde&Schwarz ZVL

Jedná se o vektorový obvodový analyzátor, který nabízí oproti spektrálním analyzátorům několik výhod – neměří totiž pouze skalární hodnotu amplitudy, ale snímá zvlášť také vlastnosti fáze. Data signálu jsou proto v komplexním formátu, což umožňuje vykreslovat průběh v polárním grafu či Smithově diagramu, případně zobrazit průběh fáze nebo skupinového zpoždění. ZVL navíc na měřený obvod nahlíží jako na jednobran, resp. dvojbran, nabízí proto dva vstupní porty, které je možné využít pro měření rozptylových s-parametrů. Obvodový analyzátor ZVL je vyráběn ve třech modelech: ZVL3 s rozsahem 9 kHz až 3 GHz, ZVL6 s rozsahem 9 kHz až 6 GHz a ZVL13 s rozsahem 9 kHz až 13,6 GHz. Využitý model pro praktické měření je ZVL13. Před započítím měření bylo nutné provést kalibraci za pomoci kalibračního kitu. Jedná se o kit ZV-Z135, který je poskytován přímo k přístroji (příloha C, obr. C.5).

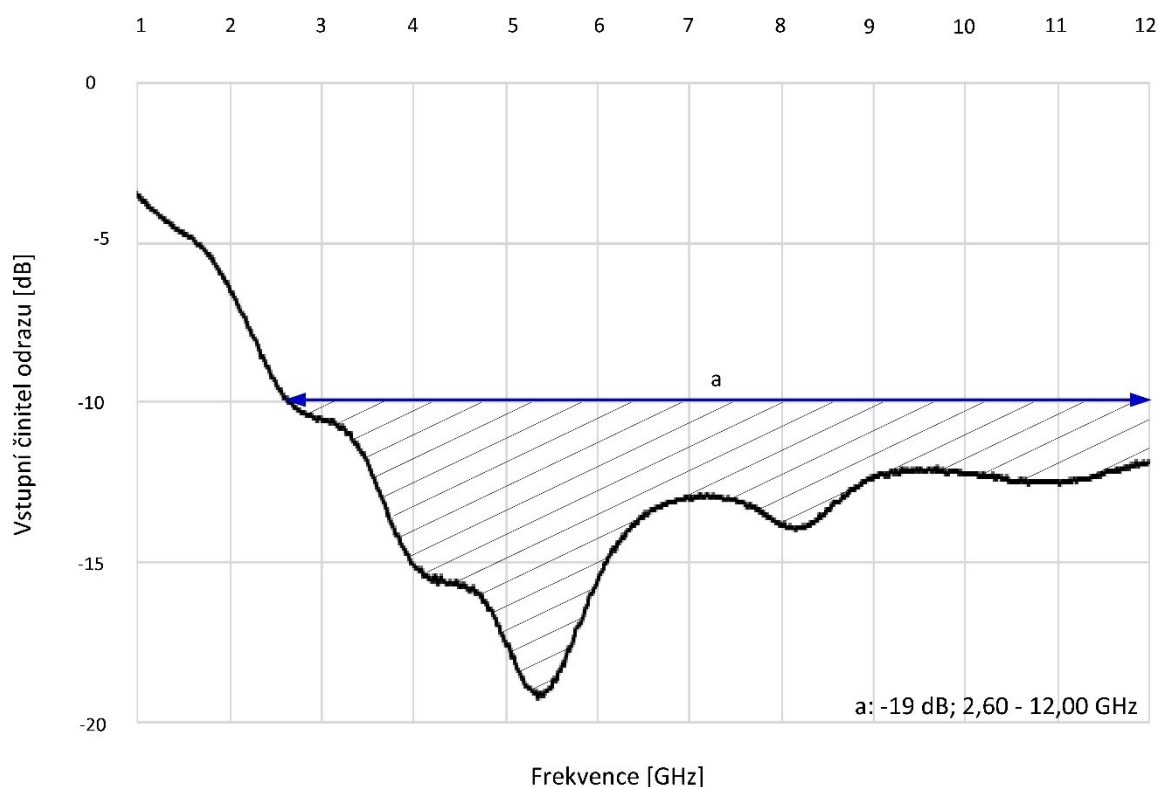


Obrázek 5.1: Vektorový analyzátor Rohde&Schwarz ZVL-13

## 5.2 Praktické ověření vstupního činitele odrazu a směrových charakteristik antén

Hlavním měřeným parametrem byl vstupní činitel odrazu a směrové charakteristiky. Měření bylo prováděno v rozsahu 500 MHz – 12 GHz. Předmětem ověření výsledků byly tři antény: dva modely Sierpinského pyramidové antény a jeden model Sierpinského trojúhelníkové antény.

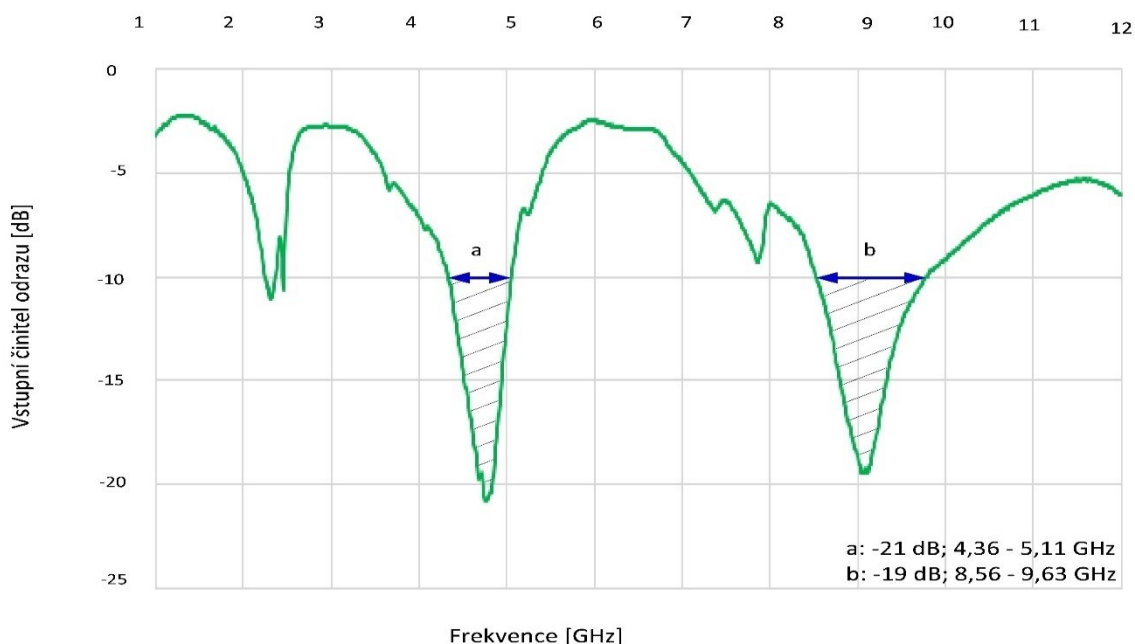
Jako první jsou na obrázku 5.2 uvedeny hodnoty měření průběhů vstupního činitele odrazu v závislosti na frekvenci. Měřeny byly dva modely Sierpinského pyramidové antény, přičemž v grafu je uváděno lepší z měření. Z výsledků je patrné dosažení cíle práce, a to širokopásmovosti modelu. Hodnoty pod -10 dB začínají od 2,60 GHz, což je zapříčiněno nutností úpravy modelu zářiče pro 3D tisk. Pokud by se v budoucnu podařilo vytisknout model optimalizovaného zářiče, hodnoty antény budou ještě více širokopásmové.



Obrázek 5.2: Měřené hodnoty vstupního činitele odrazu Sierpinského pyramidové antény

Druhým proměřovaným modelem je Sierpinského trojúhelníková anténa. Opět byl předmětem měření vstupní činitel odrazu v závislosti na frekvenci. Z výsledků na obrázku 5.3 je patrné dosažení širokopásmové struktury, avšak v porovnání s pyramidovým modelem v podstatně menší míře. Porovnání parametrů měřeného a simulovaného modelu je téměř totožné. Lepších výsledků měření by bylo opět možné dosáhnout s využitím jiného typu materiálu u konstrukce zářiče. Například využitím

keramického materiálu s PTFE. Jelikož využitý materiál typu FR4 degraduje výsledky antény při vyšších kmitočtech. Fotografie z měření antén jsou součástí přílohy C.



Obrázek 5.3: Měřené hodnoty vstupního činitele odrazu Sierpinského trojúhelníkové antény

Dalším předmětem ověření bylo měření směrových charakteristik. Měření bylo prováděno ve firmě Era Pardubice v bezodrazové komoře. Pro měření byl využit vektorový analyzátor Hewlett Packard 8410 C. Fotografie z měření jsou součástí přílohy C.

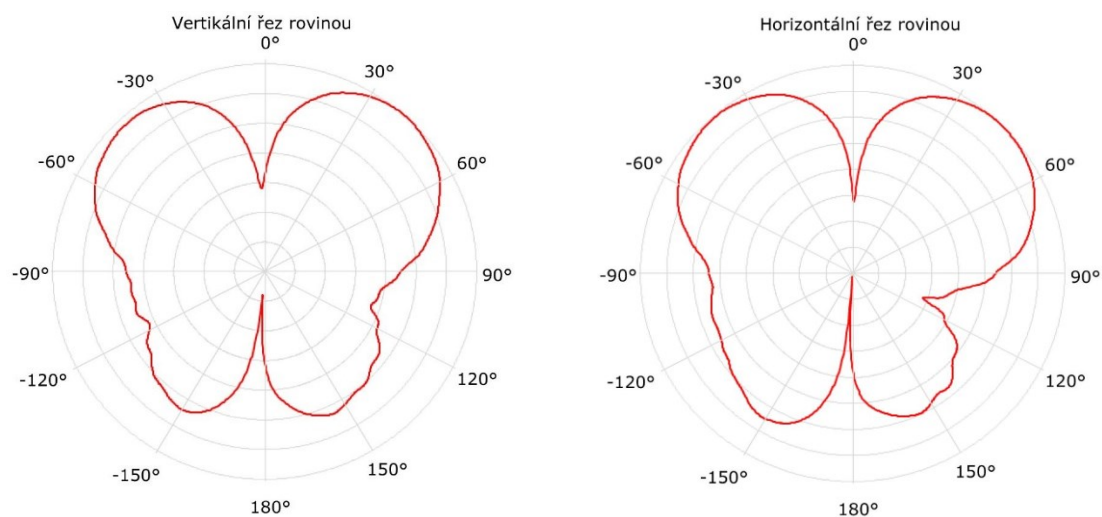
Měření směrových charakteristik bylo prováděno pouze pro Sierpinského pyramidovou anténu, a to ve vertikální a horizontální rovině. Na obr. 5.4–5.7 jsou výsledky zobrazeny v polárním zobrazení. Směrové charakteristiky byly měřeny pro kmitočty 3, 6, 9 a 12 GHz. Měření probíhalo ve vzdálené zóně 7,5 m.

Vertikální a horizontální řez rovinou pro 3 GHz odpovídá teoretickým výsledkům, tedy hodnotám simulované antény. Výsledky se jen mírně liší. Opět je zřejmé větší vyzařování Sierpinského pyramidové antény do stran. Směrovost antény je větší v horizontálním směru.

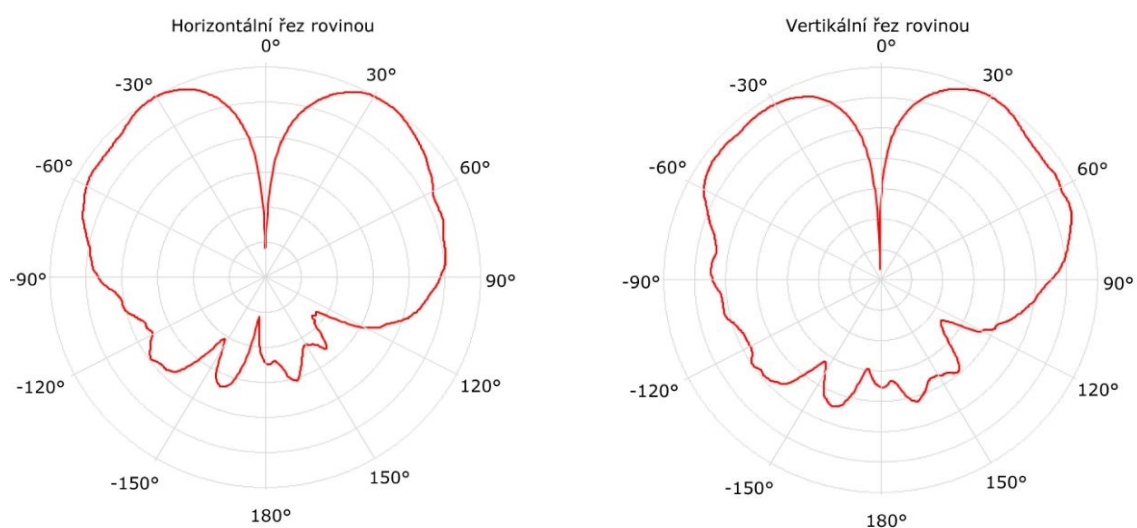
U vyšších kmitočtu, jako jsou hodnoty 6, 9 a 12 GHz se výsledky opět blíží teoretickým. Jsou však patrné poměrně větší boční laloky, které zajišťují záření Sierpinského pyramidové antény do stran. U všech charakteristik, jsou výsledky kvalitnější v horizontální rovině. V této rovině dochází i ke zlepšení směrovosti oproti simulovaným hodnotám. Odlišnosti, které vznikly vůči simulovaným hodnotám jsou způsobeny zejména povrchovou úpravou a mírnými nepřesnostmi konstruovaných modelů. Jelikož v pásmu, pro které jsou antény konstruovány: UKV (Ultra krátké vlny) a SKV (Super krátké vlny) odlišnost, byť i o desetiny milimetru, může způsobit mírnou změnu chování antény.

Ověření antén vektorovým analyzátozem a v bezodrazové komoře bylo dosaženo výsledků korespondujících s teoretickými předpoklady. Tímto je ověření správnosti návrhu a konstrukce antén splněno. Antény odpovídají teoretickým předpokladům a splňují cíle práce.

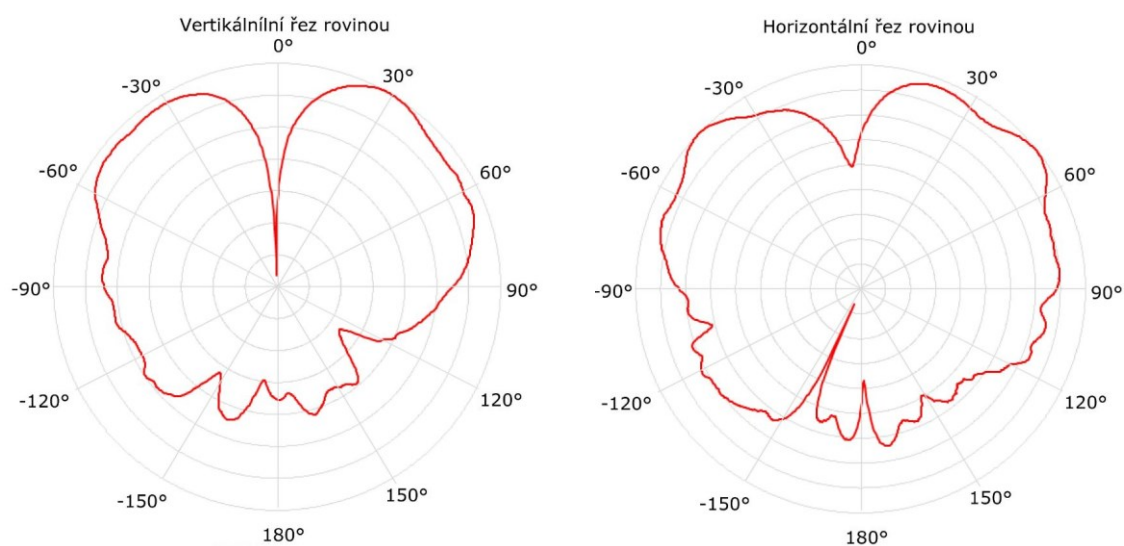




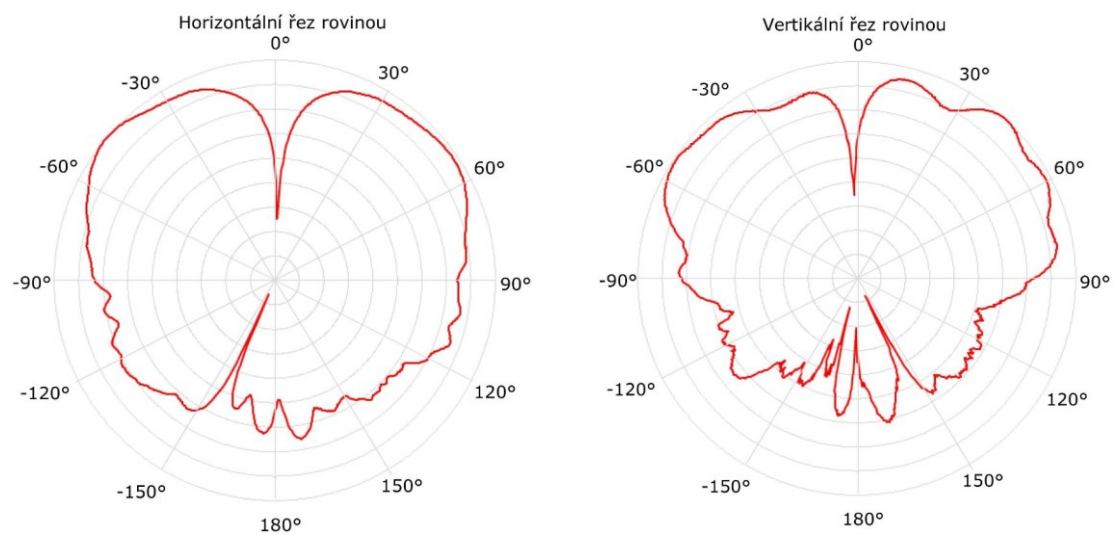
Obrázek 5.4: *Směrové charakteristiky Sierpinského pyramidové antény ( $f = 3 \text{ GHz}$ )*



Obrázek 5.5: *Směrové charakteristiky Sierpinského pyramidové antény ( $f = 6 \text{ GHz}$ )*



Obrázek 5.6: *Směrové charakteristiky Sierpinského pyramidové antény ( $f = 9 \text{ GHz}$ )*



Obrázek 5.7: *Směrové charakteristiky Sierpinského pyramidové antény ( $f = 12 \text{ GHz}$ )*



## Závěr

Cílem diplomové práce byl popis, návrh, optimalizace a výroba modelu fraktálové antény vzhledem k širokopásmovosti.

Pro lepší pochopení pojmů používaných v práci jsou první kapitoly věnovány popisu fraktálu. Přičemž hlavní důraz zde je kladen zejména na fraktálovou geometrii, dimenzi fraktálu, tvorbu fraktálu a uvědomění si, že fraktál není jen obrazec. Po krátkém úvodu do problematiky fraktálu, práce pokračuje dále využitím fraktálové geometrie v anténní technice. Jsou zde popsány výhody a specifika využití různých typů fraktálových útvarů v tomto oboru. Důraz je zde kladen zejména na existenci mnoha fraktálových křivek a jejich využití. Práce se více zaměřuje na problematiku Sierpinského fraktálu, jelikož tento druh útvaru, díky svým parametrům je vybrán pro následný návrh, simulaci a praktickou realizaci modelu.

Práce pokračuje návrhem modelu Sierpinského trojúhelníkové antény, kdy jsou využity výpočetní aparáty k odhadu rezonančních frekvencí. Následně je provedena simulace antény v programu CST Microwave Studio. Simulace se věnují nejvíce parametru širokopásmovosti. Za tímto účelem jsou provedeny analýzy vlivů: iterování tvarů, změny rozměrů trojúhelníků, změny velikosti reflektoru a následné využití optimalizačních algoritmů k dosažení co nejlepších výsledků. Z provedených analýz bylo zřejmé, že jednotlivé vlastnosti spolu při kmitočtovém ladění úzce souvisí a nejlepších parametrů bylo dosaženo se 4. iterací. Díky analýze a optimalizaci se podařilo dosáhnout cílů práce, a to sestrojení širokopásmové antény. Širokopásmovost se projevila na těchto frekvenčních pásmech: 2,38 – 2,64 GHz; 4,71 – 5,81 GHz; 10,07 – 11,69 GHz. Přičemž zisk antény se pohyboval v rozmezí 4–9 dBi a směrovost antény byla větší v horizontálním směru. Jelikož je cílem práce co možná nejvíce širokopásmová anténa, provedl jsem další analýzy tvarů Sierpinského geometrie. Výsledkem mnoha experimentování a pokusů jsem dospěl k 3D variantě Sierpinského trojúhelníku respektive k Sierpinského pyramidě.

Sierpinského pyramida je velmi unikátní strukturou pro využití v anténní technice. Její tvar a samotná praktická realizace vůči velikosti a složitosti modelu není úplně snadno realizovatelná. I přesto jsem provedl simulaci, opětovné analyzování, zkoumání vlivů iterování struktury, změn rozměrů antény, vlivu výšky zářiče od reflektoru, změn velikosti reflektoru a následnou optimalizaci. Výsledkem bylo dosažení velmi unikátní širokopásmové struktury antény 3. iterace a zlepšení parametrů vůči Sierpinského trojúhelníku. Anténa vykazovala širokopásmovost na frekvenčních pásmech: 2,20 – 2,92 GHz; 4,20 – 6,69 GHz a 8,94 – 14,73 GHz. Zisk antény je v rozmezí 2–8 dBi a směrovost antény je větší v horizontálním směru. Rozhodl jsem se i tento motiv fraktálu využít pro praktickou realizaci antény.

Obě zmiňované optimalizace byly provedeny optimalizačním algoritmem Neelder Mead Simplex, pro který byly nastaveny zkoumané parametry, operátory a rozsah hodnot optimalizování.

Práce se dále věnuje praktické realizaci modelů. Prvním konstruovaným modelem antény byla Sierpinského trojúhelníková anténa. Konstrukce nebyla nijak zvlášť složitá, bylo však nutno dbát na správné prokovení otvorů pro SMA konektor a následné provlečení teflonového kroužku do roviny s reflektorem. Hlavním úskalím a zároveň budoucím vylepšením modelu je možnost změny materiálu zářiče. Materiálem zářiče je FR4 deska, která není vhodná pro aplikaci na vyšších kmitočtových pásmech a dochází tak k degradaci antény. Materiál byl zvolen z důvodu cenové dostupnosti, jelikož je

model konstruován pouze pro ověření správnost konstrukce. Pokud by model měl být následně využíván i v praxi např. jako anténa pro mobilní systémy či bezdrátové sítě, doporučuji využít na konstrukci zářiče materiál keramický s PTFE, který je vhodný využít až do 10 GHz. Jeho cena je však mnohonásobně vyšší.

Druhou praktickou realizací antény byla Sierpinského pyramidová anténa. Zde už je samotná konstrukce mnohem složitější. Nejvhodnější variantou reflektoru se ukázalo využití hliníkové desky, do které byl připevněn pomocí zapuštěných šroubů SMA konektor. Pro výrobu zářiče bylo nutné využít 3D tisku, který však přinesl mnohá úskalí. Hlavním problémem byla nerealizovatelnost optimalizovaného zářiče dostupnou technologií tisku. U zářiče byly tudíž provedeny změny, které vedly k úspěšnému vytištění modelu. Dále bylo nutností zamyslet se nad důmyslným upevněním zářiče k reflektoru. Jakožto nejstabilnější a nejvhodnější variantou upevnění byla zvolena výroba plechového „kornoutu“, který byl upevněn ke středovému pinu konektoru, do kterého byl zářič zasazen a následně přestříkán vodivou vrstvou měděného spreje. Do budoucnosti se nabízí mnohá zlepšení této konstrukce antény. Při využití jiné technologie 3D tisku nebo hlouběji propracovanou konstrukcí tisku, je možné dosáhnout výroby širokopásmového modelu zářiče a tím získat kvalitnějších hodnot širokopásmovosti antény. Dalším možným vylepšením konstrukce je provedení pokovení 3D vytištěného zářiče a tím dosažení lepších parametrů a stability antény. Nabízí se dvě možnosti, a to provést pokovení vytištěného zářiče nebo odlítí modelu zářiče do formy. Pokud by byla nutná vzhledem k použití pevná stabilita antény, je možné využít podpěry zářiče, které by tyto požadavky splňovaly. Vhodným materiálem pro tvorbu podpěr je Spiel, u kterého je hodnota relativní permitivity blízká vzduchu, tudíž by nedocházelo k ovlivnění parametrů antény.

Poslední částí práce je ověření správnosti návrhu a konstrukce měřením. Měření vyrobených antén bylo provedeno na vektorovém obvodovém analyzátoru s rozsahem do 13,6 GHz. Hlavním měřením a porovnávaným parametrem byl vstupní činitel odrazu. Antény splňovaly cíle práce, a to širokopásmové chování. Dalším praktickým ověřením správnosti návrhu a konstrukce bylo měření směrových charakteristik v bezodrazové komoře. Opět bylo prokázáno podobné chování antén, jako u antén simulovaných. Pro dosažení lepších výsledků prakticky realizovaných modelů je možné využít má předešlá doporučení u popisu výroby antén.

I přes mnohá úskalí simulací, návrhů a výroby antén považuji výsledky simulací a praktických modelů za zdařilé. Zejména Sierpinského pyramidová anténa vykazuje kvalitní širokopásmové chování. Antény jsou schopné pracovat v pásmech UKV a SKV. Využití 3D technologie v anténní technice se rovněž ukázalo, jako přínosné. Existují struktury antén, které bez těchto moderních technologií jsou nerealizovatelné a do této kategorie spadá i Sierpinského pyramidová anténa. Práci je v budoucnu možné rozšířit možným zmíněným vylepšením konstrukcí antén a dalším zkoumáním fraktálových motivů a jejich využitelnosti v anténní technice.

## Použitá literatura

- [1] MANDELBROT, Benoît B. Fraktály: tvar, náhoda a dimenze. Vyd. 1. Praha: Mladá fronta, 2003. Kolumbus. ISBN 80-204-1009-0.
- [2] ZELINKA, Ivan, František VČELAŘ a Marek ČANDÍK. Fraktální geometrie: principy a aplikace. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-191-8.
- [3] KOUDELKA, V. *Neuronová síť pro návrh širokopásmové antény*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. 42 s., 1 příl.
- [4] COHEN, Nathan, Fractal antennas and fractal resonators, červen 2008.
- [5] PROCHÁZKA, Miroslav. *Antény: Encyklopedická příručka*. 3., rozšíř. vyd. Praha: BEN technická literatura, 2000, 287 s. ISBN 80-730-0166-7.
- [6] KRZYSZTOFIK, W. J. Modified Sierpinski Fractal Monopole for IMS-Bands Handset Applications. *Senior Member, IEEE*. 2009, vol. 57, no. 3, p. 606-615.
- [7] PUENTE BALIARDA, Carles, ROMEU, Jordi, POUS, Rafael, CARDAMAN, Angel The koch monopole: A small fractal antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 48:11, listopad 2000.
- [8] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005, xvii, 1117 s. ISBN 978-0-471-66782-7.
- [9] PUENTE, C., ROMEU, J., POUS, R., RAMIS, J., and HIJAZO, A. Small but long koch fractal monopole. *Electronics Letters*, 34:7, leden 1998
- [10] Fraktály. *Fraktály* [online]. Brno: Pavel TÍŠNOVSKÝ, 2000 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/~tisnovpa/fract/clanky/1.htm>
- [11] FUJIMOTO, K. HISHASHI. MORISHITA. *Modern small antennas*. ISBN 9780521877862.
- [12] PUENTE BALIARDA, Carles, ROMEU, Jordi, POUS, Rafael, CARDAMAN, Angel *On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna.*, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol 46, No4, April 1998
- [13] PUENTE, C., ROMEU, J., POUS, R., CARDAMA, A. On the behavior of the Sierpinski multiband antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1998, vol. 46, no. 4, p. 517-524.
- [14] C. BORJA, J., C. PUENE and A. MEDINA, *Iterative Network Model to Predict the Behavior Sierpinski Fractal Network*, *Electronics Letters* 23rd july 1998 Vol 34 No 15.
- [15] *IEEE antennas*. Vol. 50, No. 3, June 2008. New York, NY: Antennas and Propagation Society of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1990. ISBN 1045-9243.
- [16] ČERNOHORSKÝ, D., RAIDA, Z., ŠKVOR, Z., NOVÁČEK, Z. *Analýza a optimalizace mikrovlnných struktur*. 1. vyd. V Brně: VUTIUUM, 1999, 284 s. ISBN 80-214-1512-6.

## Elektronické přílohy

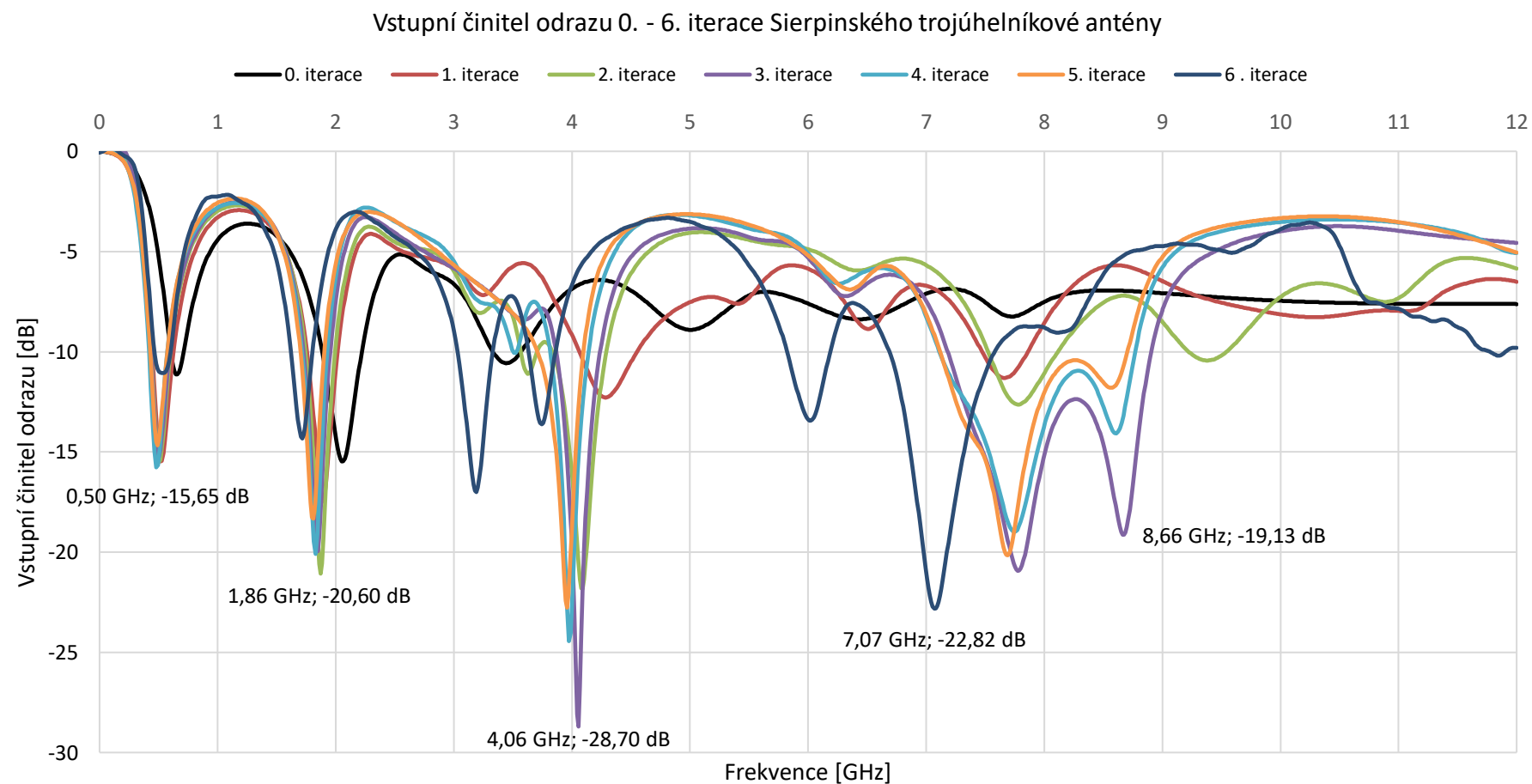
Součástí práce je DVD obsahující tyto přílohy:

Diplomova\_prace\_optimalizace\_fraktalove\_anteny.zip

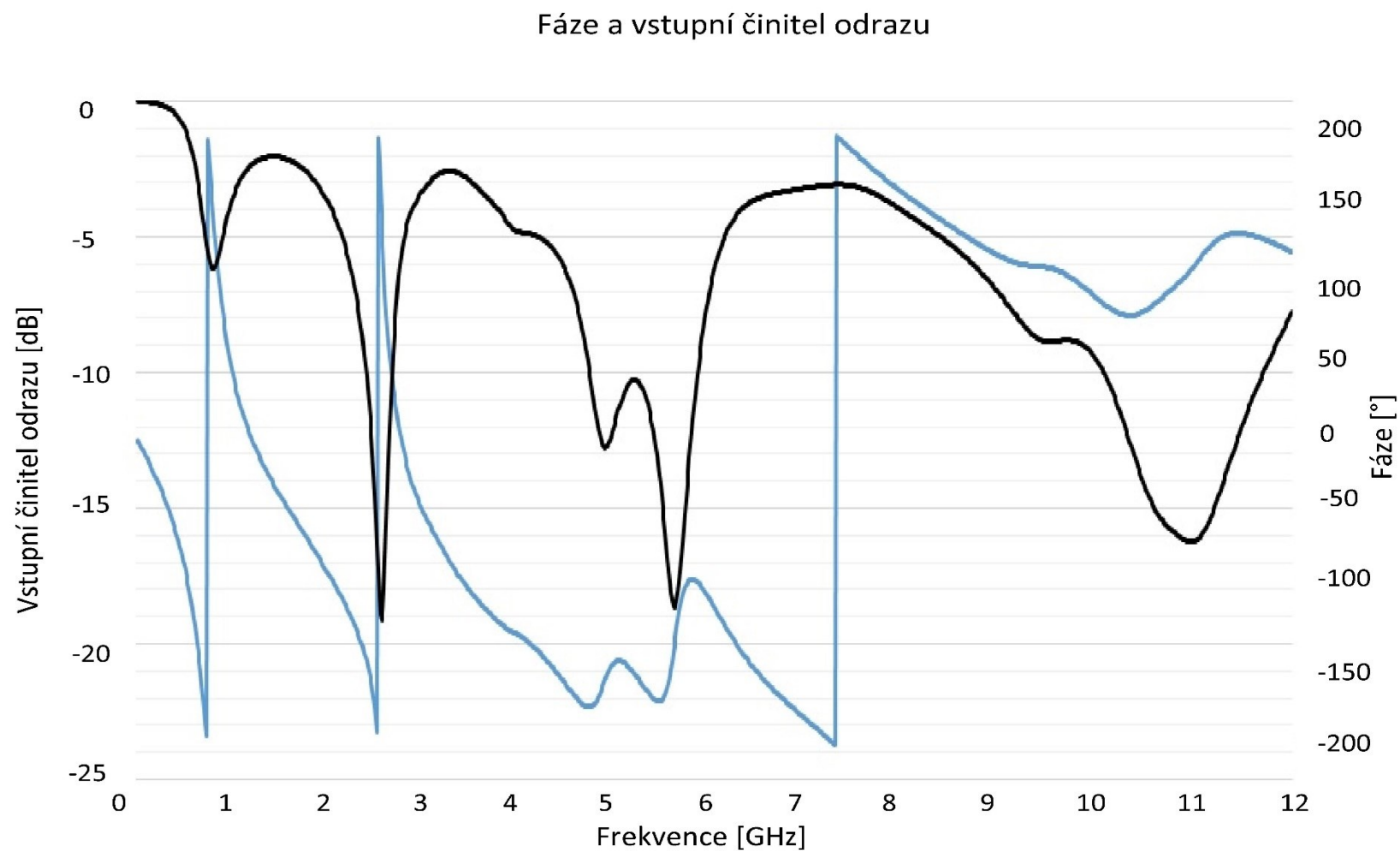
- Antena\_pyramida.cst – Simulace Sierpinského pyramidová anténa v CST Microwave Studio
- Antena\_trojuhelnik.cst - Simulace Sierpinského trojúhelníkové antény v CST Microwave Studio
- 3Dtisk.gcode – Data pro 3D tisk modelu Sierpinského pyramidové antény
- 3Dtisk.stl - Vyexportovaný formát Sierpinského pyramidové antény pro 3D tisk
- 3Dtisk\_sirokopasmove.gcode – Data pro 3D tisk modelu širokopásmové Sierpinského pyramidové antény
- 3Dtisk\_sirokopasmove.stl – Vyexportovaný formát širokopásmové Sierpinského pyramidové antény pro 3D tisk

## **Přílohy**

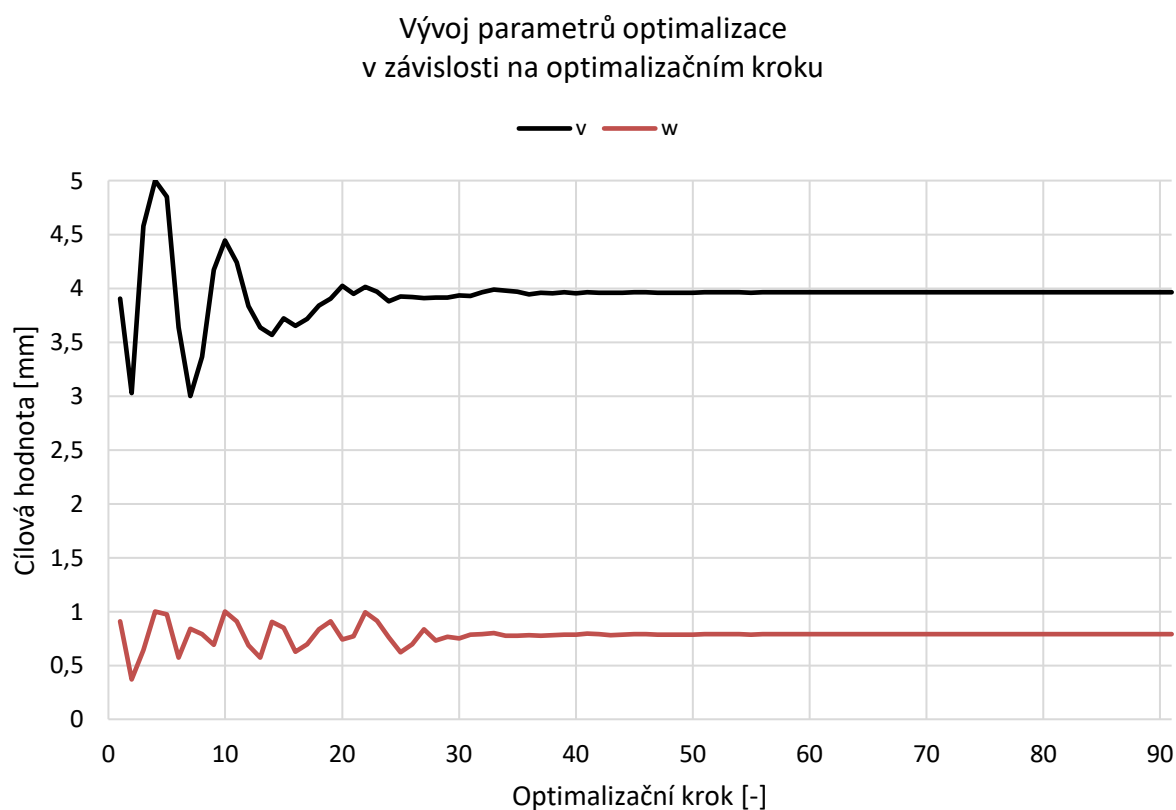
Příloha A:	Grafy ze simulací.....	I
Příloha B:	Fotografie z výroby antén.....	ii
Příloha C:	Fotografie z měření antén .....	vii



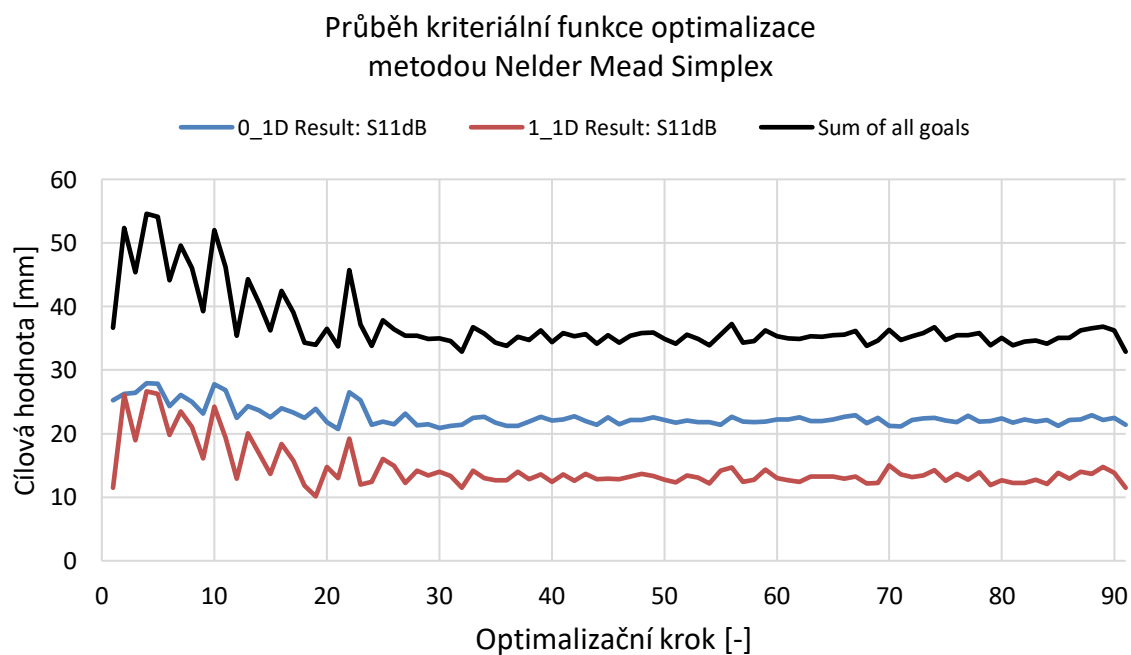
Obrázek A. 1: Parametr vstupního činitele odrazu pro všech šest iterací Sierpinského trojúhelníkové antény



Obrázek A.2: *Vstupní činitel odrazu s fází pro Sierpinského trojúhelníkovou anténu*

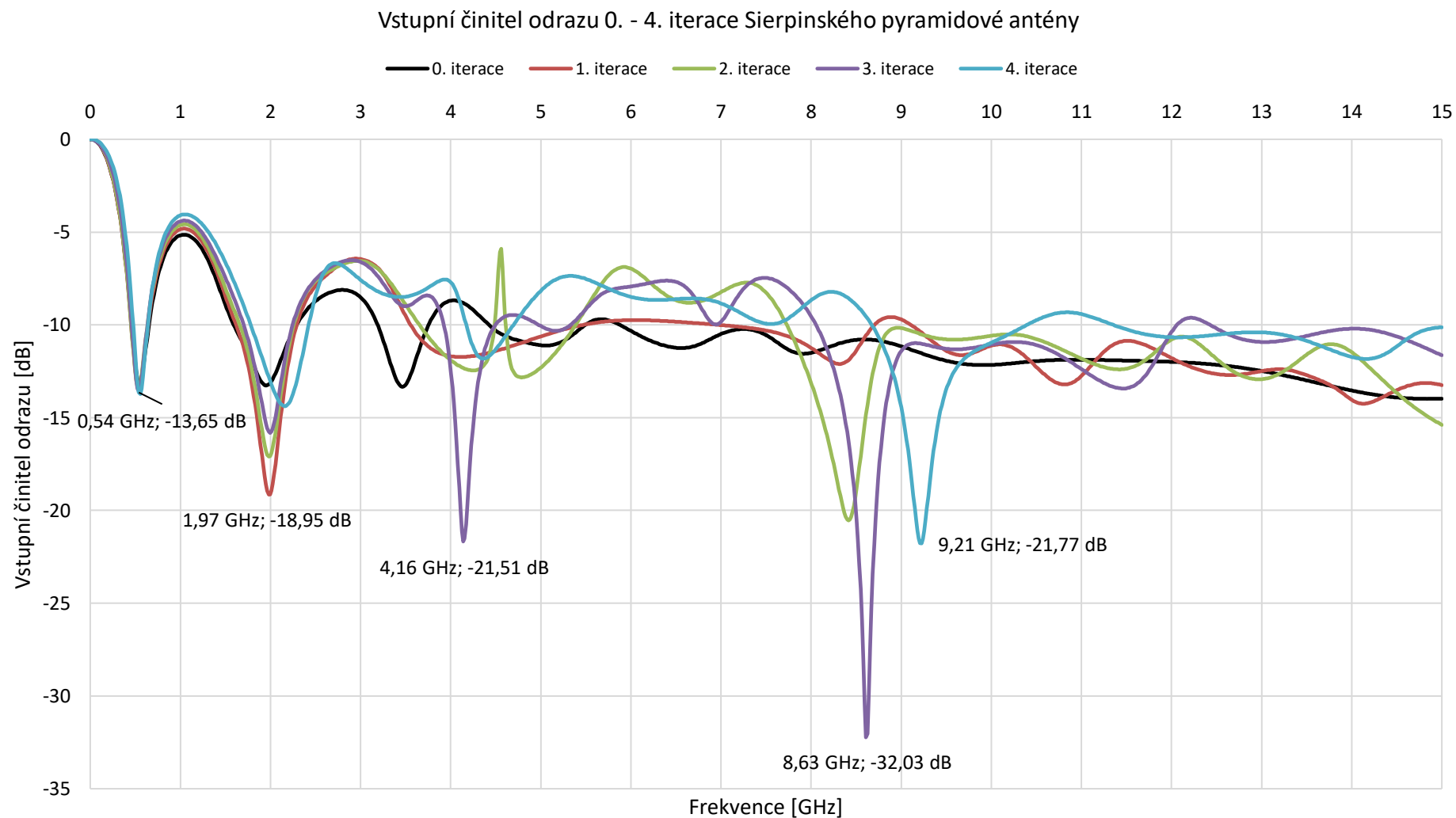


Obrázek A.3: Vývoj parametrů optimalizace Sierpinského trojúhelníkové antény v závislosti na optimalizačním kroku

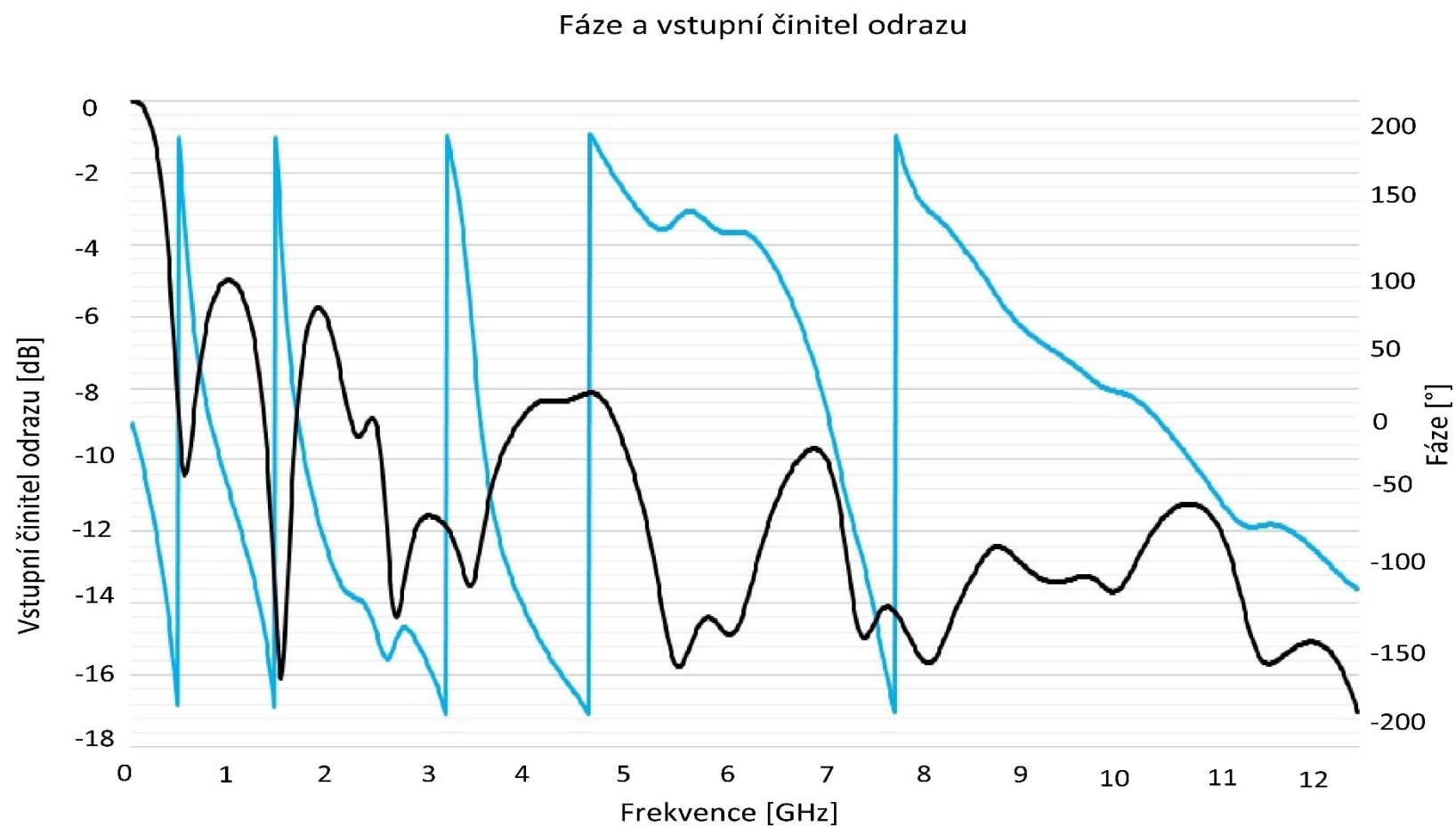


Obrázek A.4: Průběh kritériální funkce Sierpinského trojúhelníkové antény – optimalizace metodou Nelder Mead Simplex

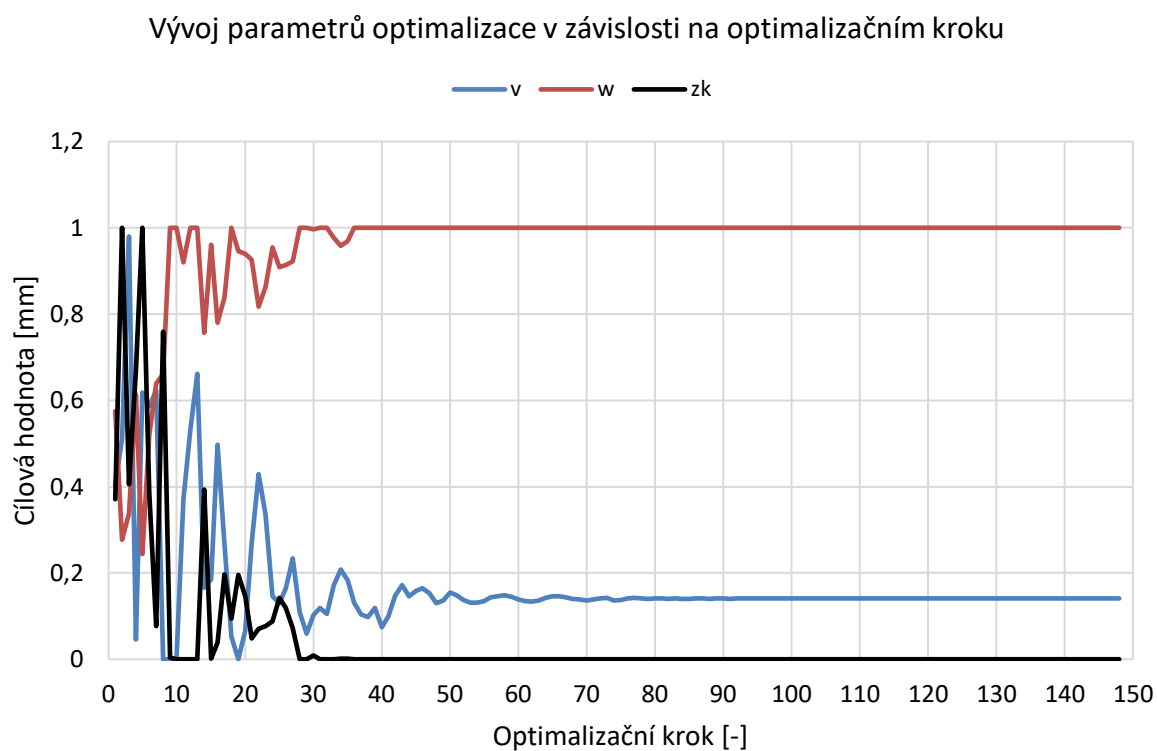




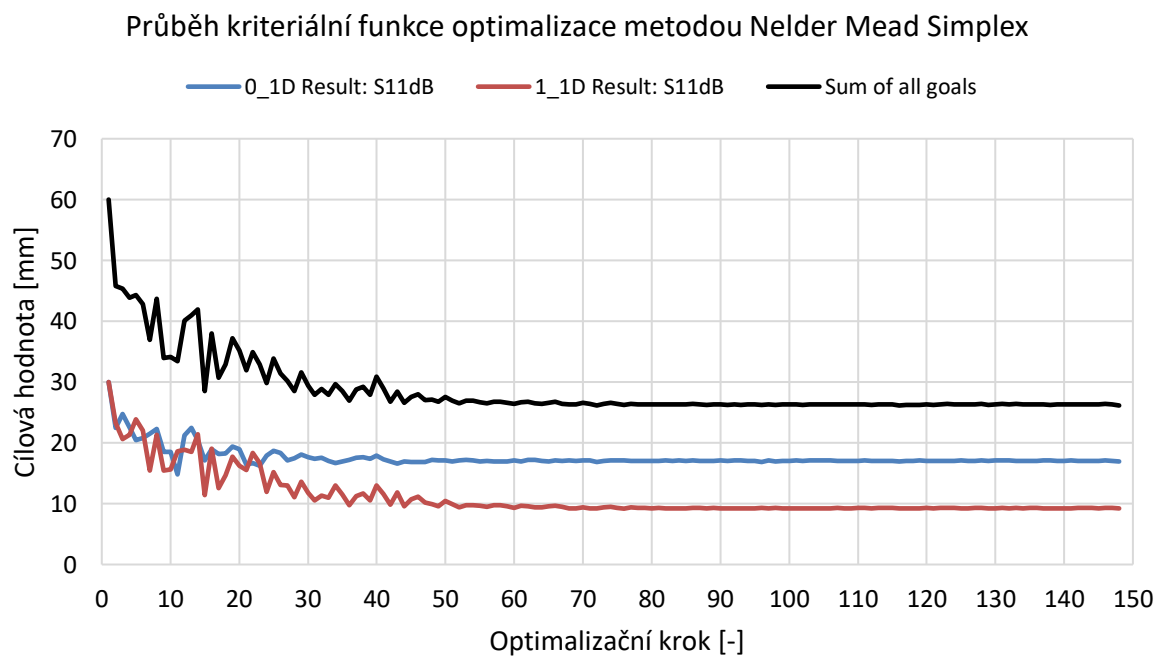
Obrázek A.5: Parametr činitele odrazu pro všechny čtyři iterace Sierpinského pyramidy



Obrázek A.6: *Vstupní činitel odrazu s fází pro Sierpinského pyramidovou anténu*

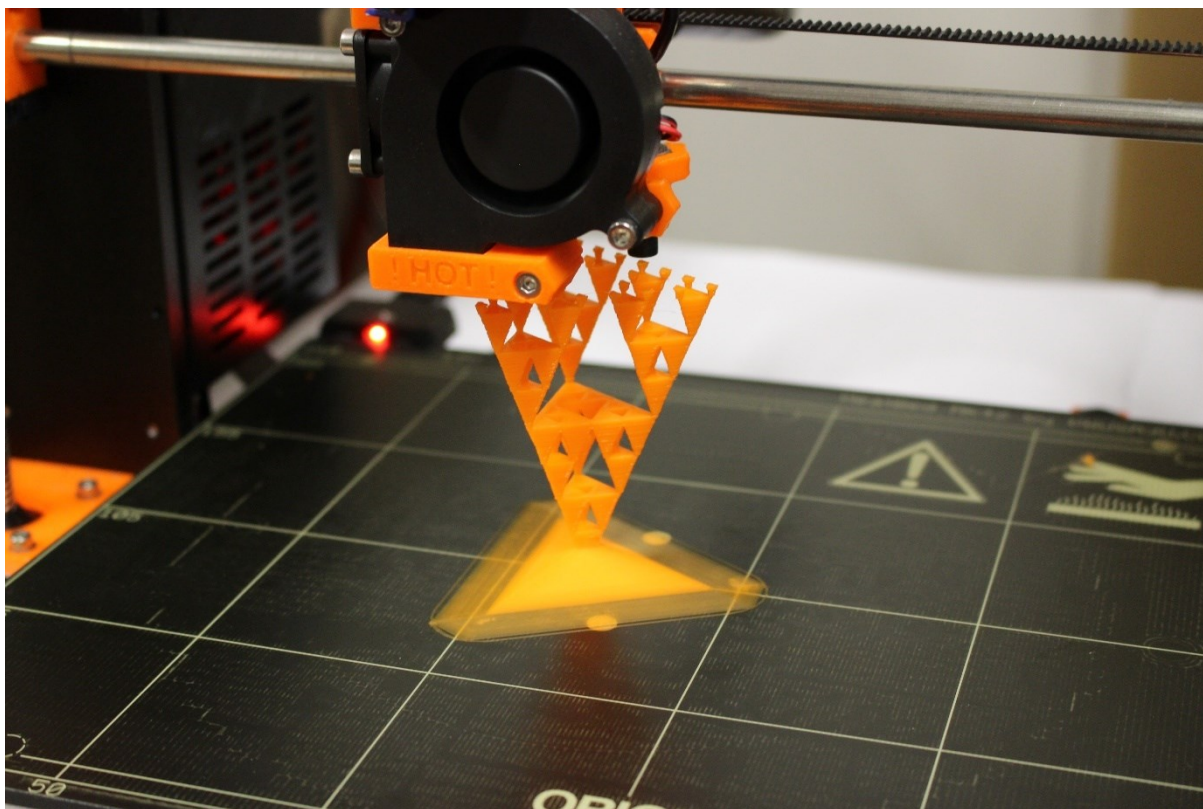


Obrázek A.7: Vývoj parametrů optimalizace Sierpinského pyramidové antény v závislosti na optimalizačním kroku

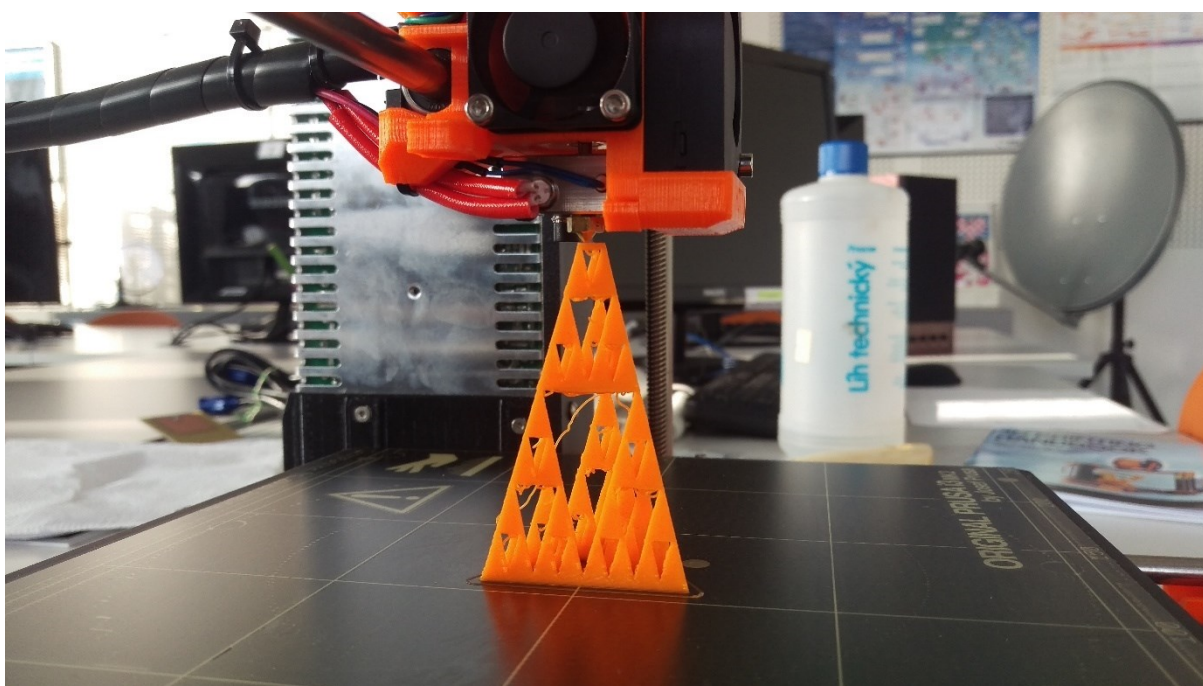


Obrázek A.8: Průběh kritériální funkce Sierpinského pyramidové antény – optimalizace metodou Nelder Mead Simplex

Příloha B: *Fotografie z výroby antén*

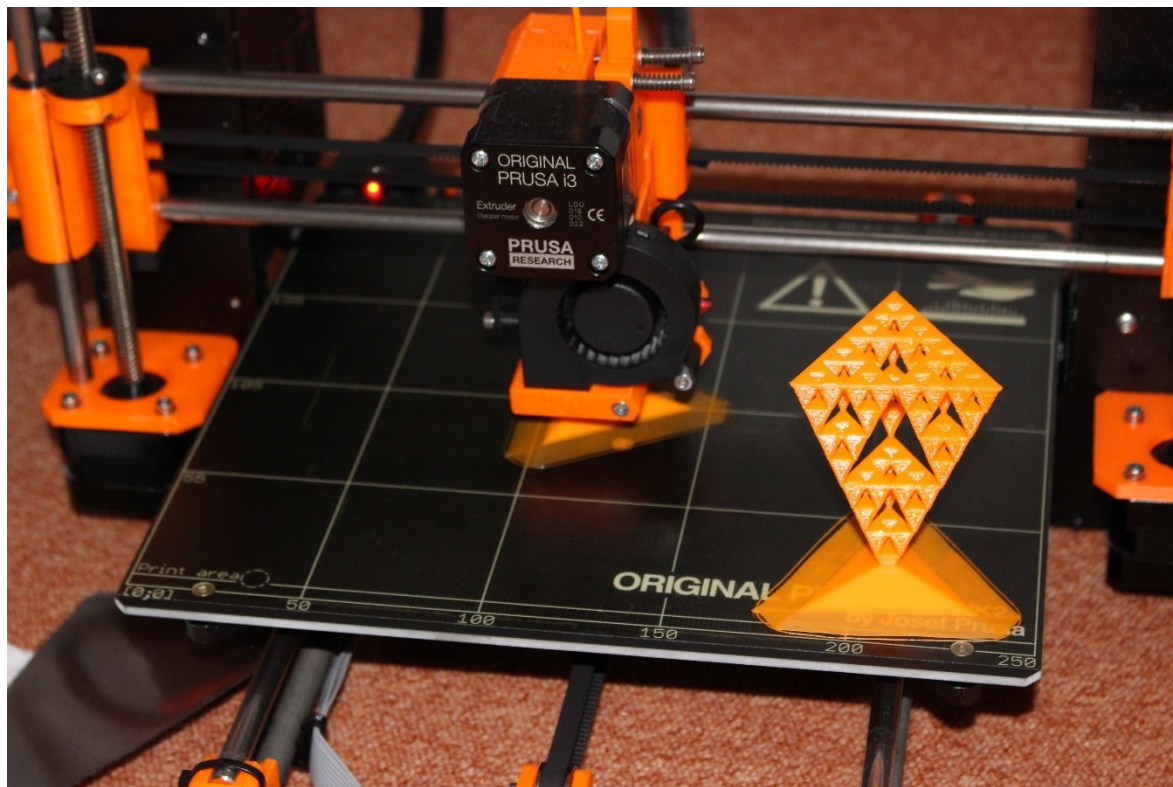


*Obrázek B. 1: 3D tisk Sierpinského pyramid s podpěrou*

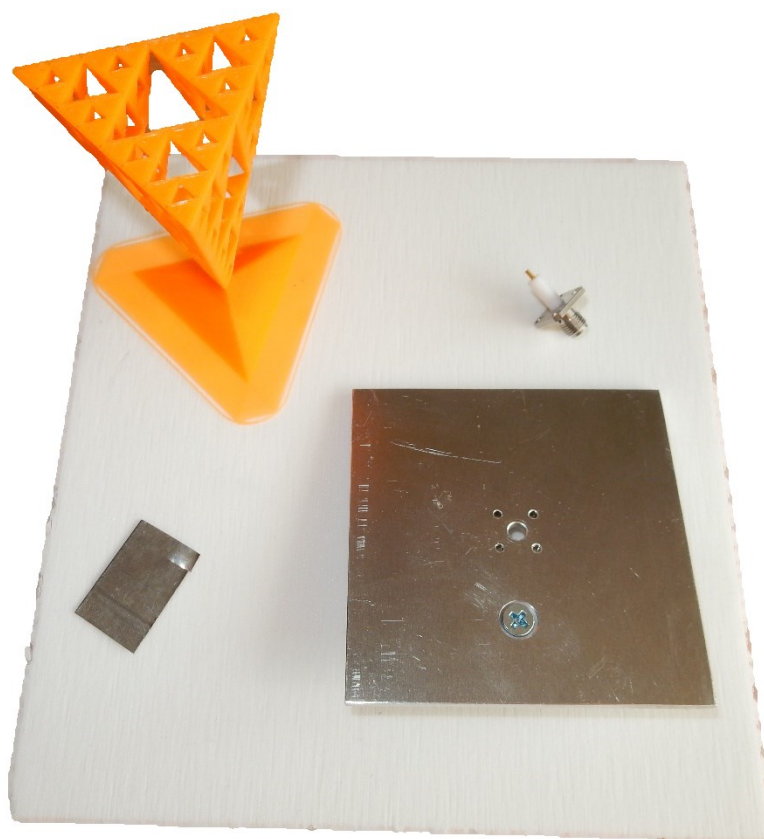


*Obrázek B. 2: 3D tisk Sierpinského pyramid od podstavy – nerovný povrch ploch*





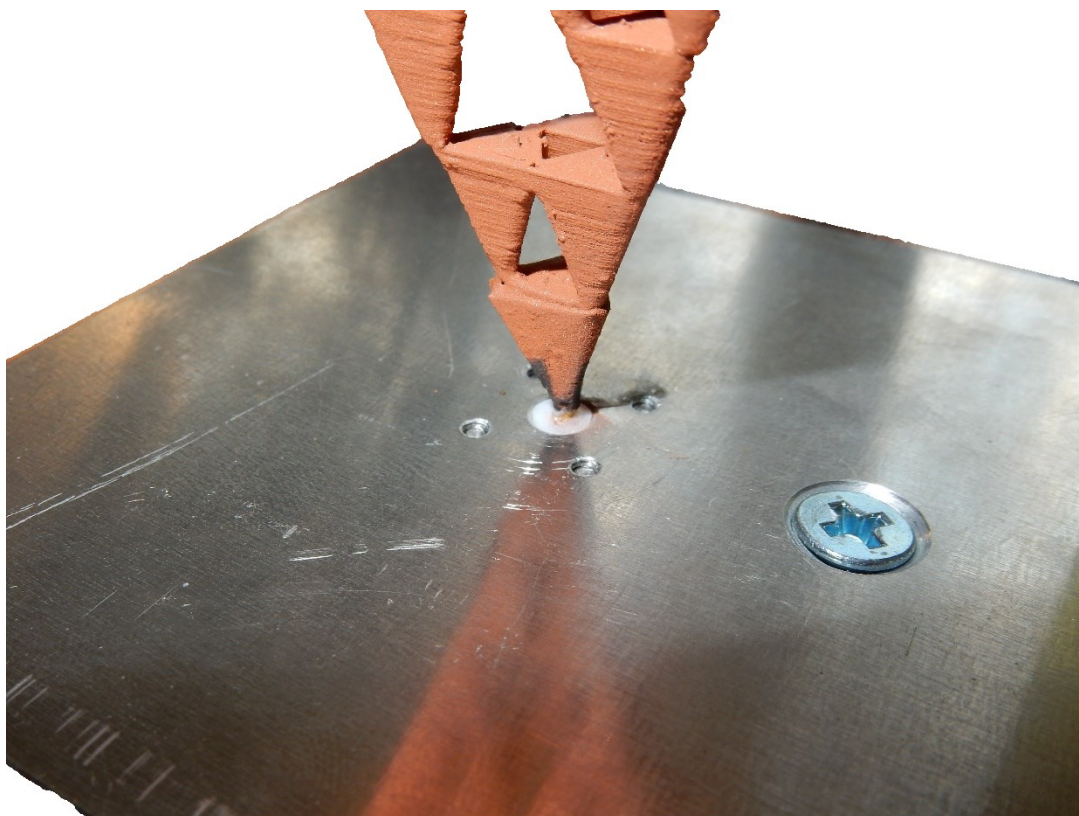
*Obrázek B. 3: 3D tisk Sierpinského pyramid*



*Obrázek B. 4: Vytiskněný zářič, konektor a plech pro výrobu „kornoutu“*



*Obrázek B. 5: „Kornout“ pro uchycení Sierpinského pyramidové antény*

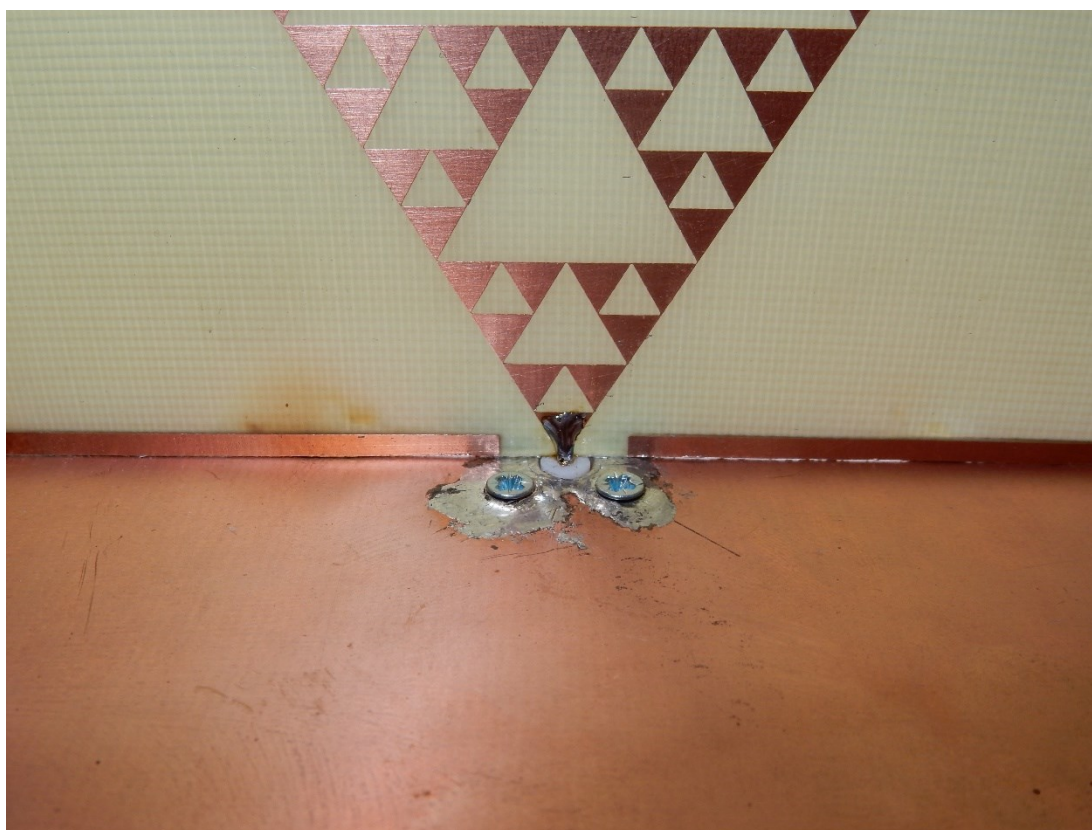


*Obrázek B. 6: Detail spoje reflektoru a zářiče Sierpinského pyramidové antény*





*Obrázek B. 7: Sierpinského trojúhelníková anténa – zářič*



*Obrázek B. 8: Detail spoje zářiče s reflektorem u Sierpinského trojúhelníkové antény*



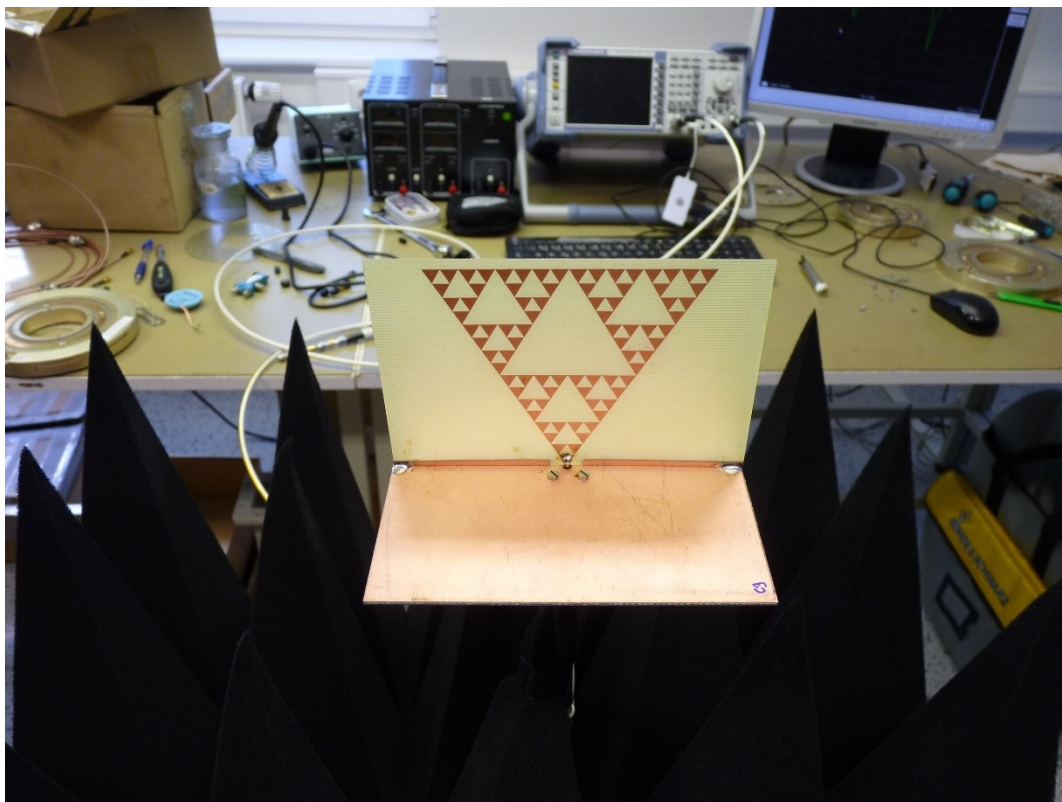
*Obrázek B. 9: Sierpinského pyramida a Sierpinského trojúhelníková anténa*



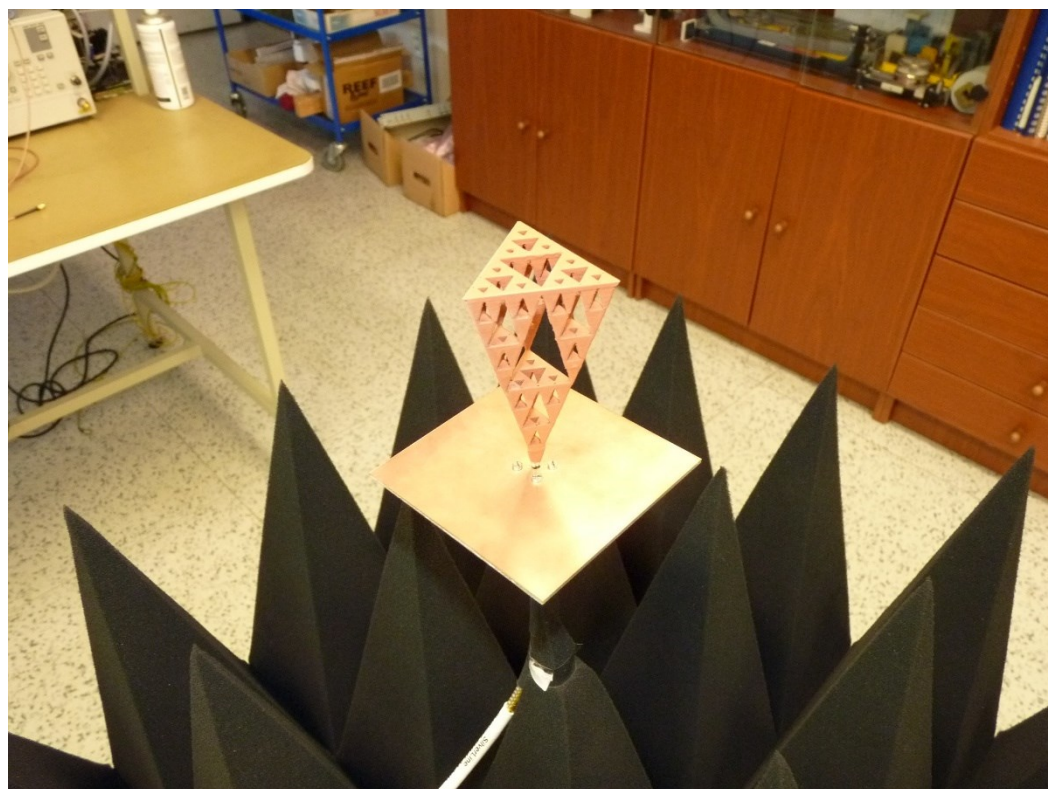
*Obrázek B. 10: Praktické modely antén vyrobené v rámci testování*



Příloha C: *Fotografie z měření antén*

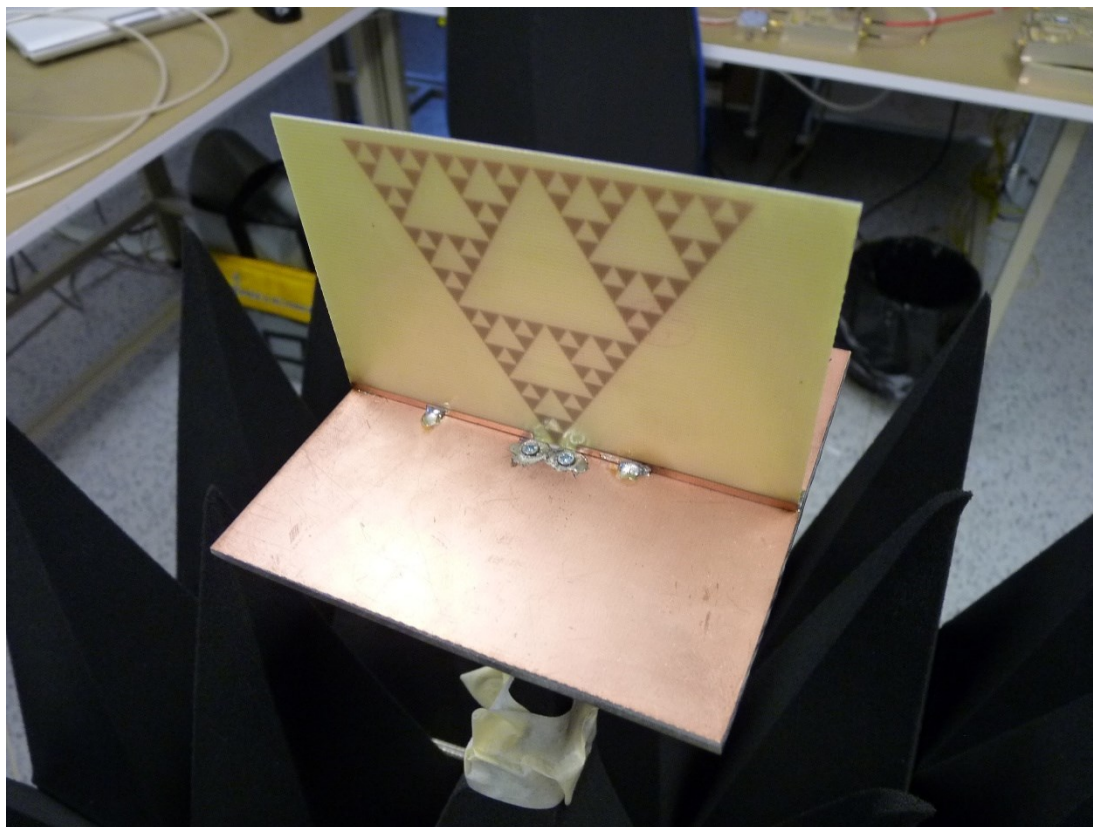


Obrázek C. 1: Praktické ověření výsledků měření – Sierpinského trojúhelníková anténa



Obrázek C. 2: Praktické ověření výsledků měření – Sierpinského pyramidová anténa





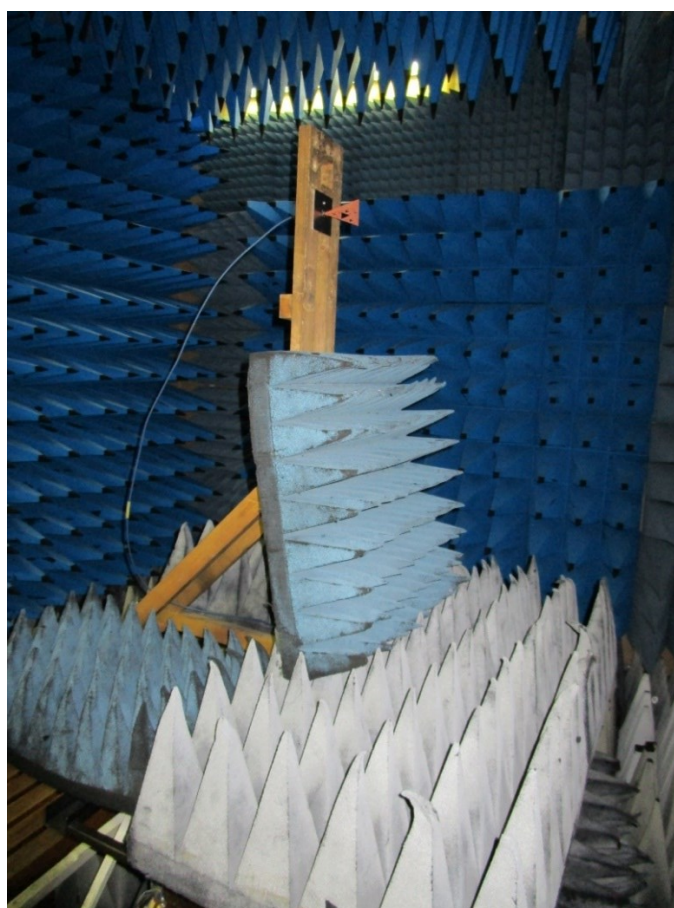
*Obrázek C.3: Sierpinského trojúhelníková anténa při praktickém měření*



*Obrázek C.4: Sierpinského pyramidová anténa při praktickém měření*



Obrázek C.5: Kalibrační kit ZV-Z135



Obrázek C.6: Měření směrových charakteristik Sierpinského pyramidové antény v bezodrazové komoře